



UFPA

Universidade Federal do Pará

Geologia de Minas e Técnicas de Lavra à Céu Aberto

FELIPE ARTUR BERNARDO FERREIRA

**PILHA DE ESTÉRIL:
DIMENSIONAMENTO E CLASSIFICAÇÃO**

**BELÉM
2016**

FELIPE ARTUR BERNARDO FERREIRA

**PILHA DE ESTÉRIL:
DIMENSIONAMENTO E CLASSIFICAÇÃO**

Projeto de Monografia apresentada à Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Especialização.

Orientador: Prof. Dr. Evaldo Raimundo Pinto da Silva

**BELÉM
2016**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Mayana, e meus filhos Vinicius e Manuella. Aos professores da Universidade Federal do Pará e àqueles que me apoiaram na construção deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a compreensão da minha família pela minha ausência, ao apoio dos professores da Universidade Federal do Pará.

EPÍGRAFE

"When you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it, but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meagre and unsatisfactory kind; it may be the beginning of knowledge, but you have scarcely, in your thoughts, advanced to the stage of science, whatever the matter may be".

Lord Kelvin

RESUMO

Na atividade de extração mineral implica a produção de uma quantidade grande de materiais de pouco ou nenhum valor econômico, conseqüentemente minério pobre ou estéril. Contudo o manejo do minério pobre responde a uma estratégia de negócio e tem um caráter de provisoriedade, a remoção do estéril da área de lavra e sua disposição final são atividades que podem ter um impacto desfavorável no desenvolvimento de uma mina com implicações de ordem econômica, de segurança e ambiental. As características relativas ao manejo de estéreis são significativas nos dias de hoje face aos grandes volumes movimentados nas operações mineiras, maior escassez de áreas adequadas à disposição, especialmente em empreendimentos mais antigos, e maior exigência dos órgãos reguladores. Essa situação faz com que seja necessário um maior esforço de planejamento das atividades de projeto, construção, operação e reabilitação das estruturas finais geradas pela movimentação dos estéreis. Foi realizada pesquisa documental para coletar informações relacionadas á pilha de estéril pertinente aos principais procedimentos para realização do projeto abordado nos temas como investigação geológica, desmatamento, escavação, tipo de terreno, localização, geometria, controle tecnológico, instrumentação, estudo de caso com dimensionamento e classificação. Este trabalho apresenta as principais etapas e procedimentos técnicos necessários para o dimensionamento de um projeto de uma pilha de estéril, considerando as normas, recomendações, especificações técnicas, como também levantamento bibliográfico focado em um estudo de caso, para exemplificação dos pontos importantes do projeto, como análise de estabilidade, escolha do local, definição da geometria, fatores de segurança, capacidade de armazenagem, levando-se em conta que estas são preocupações que o projetista e o executor devem considerar desde o início do planejamento da pilha de estéril. O sistema de classificação de pilha de estéril foi apresentado pelo governo canadense na obra intitulada “Mined Rock and Overburden Piles” (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991). O sistema baseia-se na avaliação ponderada de fatores que podem afetar a estabilidade física de uma pilha. A avaliação das pilhas é feita de uma forma semi-quantitativa e o resultado permite atribuir uma determinada categoria de pilha (classe) de acordo com seu potencial de instabilidade. Estas classes definem um nível de esforço recomendado para investigação, projeto, construção e monitoramento da pilha.

Palavras chave: Pilha de estéril.

ABSTRACT

Mining activities involve the production of a lot of material without economic value. However the management of poor ore responds to a business strategy and has a provisional character, removal of overburden from the mining area and its disposal activities may have an adverse impact on the development of a mine, along with implications of economic, safety and environmental factors. The characteristics of the handling of overburden are significant today given the large volumes withdrawn in mining operations, greater scarcity of suitable areas are available, especially in older developments and increases demand from regulators. This situation demands a greater degree of planning for activities, constructions, operations and rehabilitation of the structures generated by the overburden operation. It was made into a documentary; research to collect related information about mined rock and overburden piles as well as the main procedures for carrying out the project covered topics such as geological research, deforestation, excavation, terrain, location, geometry, technological control, instrumentation, case study, design and classification. This paper presents the main stages and technical procedures necessary for the design of a project of a waste dump, considering the standards, recommendations, technical specifications as well as literature focused on case study for exemplifying the important points of the project, as stability analysis, site selection, geometry, definition, safety factors, storage capacity, taking into account that these are concerns that the designer and the executor must consider from the start of planning overburden pile. The system of classifying overburden pile was presents by the Canadian government in the work entitled "Mined Rock and Overburden Pile" (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991). The system is based on careful evaluation of factors that can affect the physical stability of a pile. The evaluation of the batteries is made of a semi-quantitative manner and the result allows you to assign a particular category of pile, according to their potential for instability. These classes define a recommended level of effort to research, project, construction and monitoring of the overburden pile.

Keywords: Mine dump.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução do Valor da Produção Mineral Brasileira	4
Figura 2 – Previsão de Produção	4
Figura 3.1 – Modos de ruptura em pilhas de estéril	18
Figura 3.2 – Tipos de pilhas de estéril.....	21
Figura 3.3 – Método ascendente.....	25
Figura 3.5 – Canal Proteção de Corte.....	37
Figura 3.6 – Canal Proteção de Aterro	38
Figura 3.7 – Descida d'água.....	39
Figura 3.8 – Dissipador de Energia	40
Figura 3.9 – Escalonamento de Taludes.....	40
Figura 3.10 – Corta-Rios	41
Figura 3.11 – Canal Extravasador	42
Figura 3.12 – Corta-Rios	44
Figura 3.13 – Dreno de Espinha de Peixe	44
Figura 3.14 – Dreno Sub-Horizontal	46
Figura 3.15 – Dreno Sub-Horizontal - Detalhe	46
Figura 3.16 – Bacia de Captação	49
Figura 5.1 – Mapa do Pará.....	50
Figura 5.2 – Pilha de Estéril e Sistema de Drenagem	52
Figura 5.3 – Curva Elevação das Bancadas vs. Volume do Armazenamento.....	57
Figura 5.4 – Planta da Disposição do Estéril.....	58
Figura 5.5 – Modelo geológico-geotécnico do maciço da pilha – seção crítica A-A.....	58
Figura 5.6 – Modelo geológico-geotécnico do maciço da pilha – seção crítica B-B.....	59
Figura 5.7 – Planta da Dique de Contenção de Sedimentação	59
Figura 5.8 – Modelo geológico-geotécnico do maciço do dique – seção crítica C-C.....	60
Figura 5.9 – Análise de estabilidade estática na condição de Etapa Final – Seção A-A.....	61
Figura 5.10 – Análise de estabilidade estática na condição de Etapa Final – Seção B-B.....	61
Figura 5.11 – Análise de estabilidade estática na condição de Etapa Final – Seção C-C.....	62

LISTA DE ABREVIATURA

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NRM	Normas Reguladoras de Mineração
MME	Ministério de Minas e Energia
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
MBR	Minerações Brasileiras Reunidas
CVRD	Companhia Vale do Rio Doce
PNM	Plano Nacional de Mineração
AMB	Anuário Mineral Brasileiro
PMB	Produção Mineral Brasileira

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo Geral.....	2
1.2	Objetivo Específico.....	2
1.3	Justificativa	3
1.4	Material e Métodos	6
2	DEFINIÇÕES DOS TERMOS TÉCNICOS.....	7
2.1	Abandono do sistema de disposição de estéril:	7
2.2	Afluente do sistema de disposição de estéril	7
2.3	Barragem para contenção de estéril	7
2.4	Barramento.....	7
2.5	Bota-fora ou ponta de aterro	7
2.6	Deposição de estéril	7
2.7	Desativação do sistema de disposição de estéril.....	8
2.8	Disposição de estéril	8
2.9	Efluente do sistema de disposição de estéril.....	8
2.10	Estéril de mina.....	8
2.11	Estéril inerte	8
2.12	Estéril temporário.....	8
2.13	Ganga	9
2.14	Mineral industrial	9
2.15	Mineral-minério	9
2.16	Minério	9
2.17	Pilha de estéril	9
2.18	Rejeito de mina.....	9
2.19	Relação estéril/minério.....	9
2.20	Taxa de disposição de estéril.....	10
2.21	Vida útil.....	10
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
4	Procedimentos.....	27
4.1	Investigação geotécnica	27
4.2	Desmatamento	27
4.3	Escavação.....	28
4.4	Fundação.....	30
4.5	Instrumentação.....	31
4.6	Drenagem Ácida de Mina	34
4.7	Estruturas auxiliares.....	36
5	Estudo de Caso.....	50
5.1	Dimensionamento	50
5.2	Classificação	63
6	Conclusão	73
7	Sugestões para futuras pesquisas	74
	REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

O estéril é resíduo em forma de agregado natural composto de um ou mais minerais, desprovido de valor econômico, o qual é retirado da mina para liberar o minério de interesse. É o produto minerado, mas que não é processado antes do destino em pilhas de estéril (Robertson et al., 1985).

Segundo McCarter (1990) no passado pouca consideração era dada em projetos e construções de pilhas de estéril. O estéril removido nos trabalhos de lavra era simplesmente basculado em ponta de aterro, nas encostas ou terrenos no entorno das minas, formando pilhas de maneira desordenada, em condições precárias de estabilidade. Esses locais eram chamados de bota-fora. As aplicações dessas práticas resultaram em dispendiosos remanejamentos, com questionável estabilidade geotécnica, desastres ecológicos, perda de equipamentos, instalações e até fatalidades.

Robertson et al. (1985), Vandre (1985), Wahler (1979) e McCarter (1990) discutem que em meados da década de 1970 e início de 1980 iniciou-se a disposição controlada, os novos depósitos de estéril passaram a ser planejados e os depósitos mal formados, recompostos, buscando-se a recuperação ambiental das áreas degradadas pela mineração. Hoje, além das exigências de ordem ambiental, questões sociais e de segurança também são questionadas, tornando-se o trabalho mais rigoroso.

Os estéreis são descartados em forma de pilha pré-definida na condição natural. A disposição deste material se dá de forma contínua durante toda a etapa de extração na lavra, sendo instalado em áreas disponíveis nas proximidades do empreendimento (Aragão, 2008).

A elaboração e a execução de um projeto de disposição de pilha de estéril na mineração estão contempladas na norma ABNT NBR 13029 (2006) e sua aprovação depende de parecer favorável dos órgãos regulamentadores, como o DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral) e da Secretaria de Meio Ambiente.

Tendo em vista os riscos inerentes de acidentes ambientais relacionados ao mau dimensionamento e localização das pilhas de estéril, procurou-se neste trabalho com base em um estudo de caso, discutir os procedimentos necessários para a implantação de uma Pilha de Estéril, enfocando os fatores geotécnicos, os tipos de terrenos, a geometria das pilhas, a melhor localização, os controles tecnológicos e os equipamentos adequados.

1.1 Objetivo Geral

A presente monografia tem como objetivo apresentar os principais parâmetros técnicos para o dimensionamento de uma pilha de estéril, enfocando a construção, o controle, o monitoramento e a classificação quanto à estabilidade física.

1.2 Objetivo Específico

O trabalho contempla um estudo de caso no qual apresenta as principais etapas do dimensionamento da pilha, tais como: análise de estabilidade dos taludes, fator de segurança mínimo, capacidade de armazenagem, características geométricas e parâmetros geotécnicos para promover a construção com a segurança exigida pelo porte de tal empreendimento.

Também contempla um sistema de classificação de pilhas desenvolvido para o governo canadense com base na estabilidade física de uma pilha de estéril (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991). Esse sistema de classificação é uma ferramenta que pode ser utilizada em todas as fases da vida de uma pilha de estéril, desde o seu planejamento até o fechamento. Ela propicia realizar classificações preliminares dos possíveis locais para disposição do estéril, tornando possíveis comparações entre esses locais, quanto ao potencial de instabilidade e estabelecendo o nível de esforço de investigação, projeto, construção e monitoramento necessário para cada local de acordo com a classe encontrada.

1.3 Justificativa

A crescente demanda do consumismo do mundo globalizado e a interdependência do consumo para o desenvolvimento e a estabilidade da economia do país, ocasiona um estímulo para a busca de novas tecnologias no uso diário de itens considerados supérfluos, tais como celulares de última geração e automóveis que até pouco tempo atrás não estavam disponíveis no mercado.

Os bens minerais tem grande importância na sociedade, a tal ponto que a evolução da humanidade é dividida em função do tipo de mineral utilizado como a idade da pedra, do bronze e do ferro. Nenhuma civilização pode prescindir do uso dos bens minerais, principalmente no quesito qualidade de vida, como alimentação, agricultura, moradia, vestuário, medicina, tecnologia, comunicação, bens de consumo (computadores, televisão, fogão, geladeira, louças, talheres, painéis, etc.) inclusive artes. A engenharia civil, da mesma forma, tem grande necessidade de recursos minerais para a construção de rodovias, ferrovias, hidroelétricas e termoelétricas. A questão que se levanta é a relação estreita entre o consumismo e a mineração. Para atender as exigências da produção é necessário extrair matérias primas da natureza, fabricar e escoar o material manufaturado, com grande consumo de energia elétrica e de água. Em outras palavras, o crescimento sócio econômico implica em maior consumo de bens minerais, tornando-se importante garantir a disponibilidade dos recursos demandados pela sociedade. Portanto, existe uma relação direta entre o desenvolvimento econômico, a qualidade de vida e o consumo de bens minerais.

Diante disso, a mineração é reconhecida internacionalmente como atividade alavancadora do desenvolvimento, tendo grande participação no desenvolvimento econômico de muitas das principais nações do mundo como Canadá, Austrália, Estados Unidos, China e Brasil.

Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), a evolução do Valor da Produção Mineral Brasileira demonstra o quanto o Brasil já avançou no crescimento e diversificação da exploração de seus recursos minerais. Em 2014 foram US\$ 40 bilhões, e a previsão para 2015 é que este valor alcance US\$ 38 bilhões, conforme figura 1.

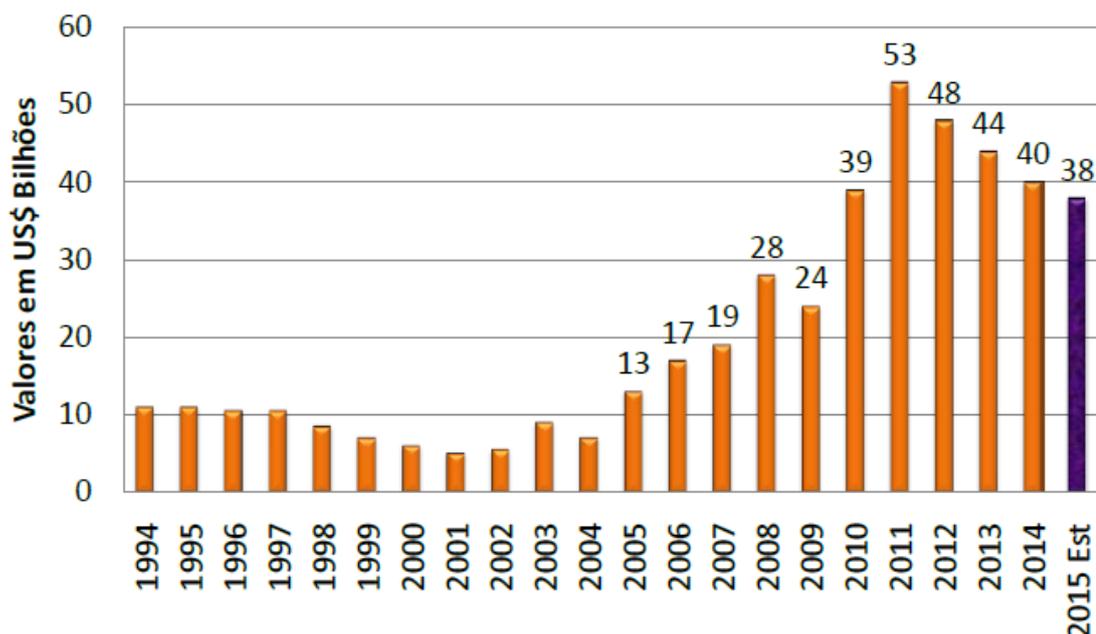


Figura 1 – Evolução do Valor da Produção Mineral Brasileira
Fonte: IBRAM (2015)

Diante do crescimento nacional e da projeção futura criou-se o Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM – 2030), cujo objetivo é nortear as políticas de médio e longo prazo que possam contribuir para que o setor mineral seja um alicerce para o desenvolvimento sustentável do país nos próximos 20 anos. A produção para alguns minerais e produtos de base mineral, com referência ao ano de 2008, para atender o consumo interno e as exportações, deverá crescer de três a cinco vezes, como mostra a figura 2.

Previsão de produção de alguns minerais e produtos de base mineral selecionados

Produto		Un.	2008	2015	2022	2030
Bem Mineral	Minério de ferro	Mt	351	585	795	1.098
	Ouro	t	55	120	180	200
	Cobre (contido)	kt	216	500	700	1.000
	Agregados	Mt	496	727	1.063	1.524
	Rochas ornamentais	Mt	7,80	11,1	15,8	22,4
	Bauxita	Mt	26,8	42,3	56,7	79,3
Metalurgia	Alumina	Mt	7,82	13,5	18,2	25,7
	Alumínio	Mt	1,66	2,04	2,51	3,18
	Níquel	kt	25,8	33,6	80,0	132
	Aço bruto	Mt	33,7	56,0	77,9	116
	Ferro-ligas*	kt	984	1.613	2.177	3.079
Não-Metálicos	Cimento	Mt	52,0	76,0	111	159
	Cerâmica vermelha	bilhão peças	70	103	150	215
	Cerâmica de revestimento	Mm²	713	1.009	1.458	2.077

Figura 2 – Previsão de Produção
Fonte: PNM (2030)

Diante do cenário de grande demanda pela produção mineral percebe-se outra consequência, o resíduo da extração da lavra. Este material é direcionado para uma espécie de bota-fora, também conhecido como pilha de estéril. Este material descartado necessita de grande área para sua disposição e apesar de não possuir nenhum valor econômico, pode representar alto risco ambiental e dano para as regiões lindeiras. Levando em consideração a magnitude dos fatores relacionados a esta estrutura de grande porte, exige-se a execução de um projeto de disposição de estéril e de rejeitos de mineração com rigorosos critérios, baseados nas principais normas e recomendações técnicas aperfeiçoadas ao longo de décadas de experiência brasileira e internacional, para a mitigação de eventuais danos materiais catastróficos e perdas de vidas.

1.4 Material e Métodos

Para alcançar os objetivos propostos nesta monografia foram realizadas as seguintes atividades:

Levantamento bibliográfico sobre as normas da ABNT que tratam especificamente sobre os procedimentos para a implantação de pilhas de estéril nos projetos de mineração, considerando as normas, recomendações, especificações técnicas, como também levantamentos bibliográficos e apresentação de um estudo de caso, para exemplificação dos pontos importantes do projeto, como análise de estabilidade, escolha do local, definição da geometria, fatores de segurança e capacidade de armazenagem.

Coleta de informações a partir de estudos de casos disponíveis na literatura, especificamente de projetos de mineração do Quadrilátero Ferrífero, como da extinta Minerações Brasileiras Reunidas S. A. (MBR), Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) e também do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Do mesmo modo, foram coletadas informações em monografias, teses e publicações nacionais e internacionais.

Por fim, foi avaliada e testada a proposta de classificação de pilhas de estéril apresentada em 1991 pela empresa de consultoria canadense Piteau Associates Eng. Ltd.

2 DEFINIÇÕES DOS TERMOS TÉCNICOS

Para melhor compreensão deste trabalho, apresentamos abaixo as definições apresentadas na NBR 13029, 2006, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a saber:

2.1 Abandono do sistema de disposição de estéril:

Fase subsequente à desativação do depósito de estéril na qual, tendo sido cumpridas e aceitas as exigências legais, o minerador se exime de qualquer compromisso sobre a manutenção ou monitoramento do sistema.

2.2 Afluente do sistema de disposição de estéril

Fração líquida (precipitação pluviométrica) que entra em contato superficial ou interno com o estéril do sistema.

2.3 Barragem para contenção de estéril

Barramento a jusante de um sistema de disposição de estéril, destinado à retenção de seus efluentes sólidos.

2.4 Barramento

Estrutura de formação de um reservatório para contenção do estéril fugitivo da pilha.

2.5 Bota-fora ou ponta de aterro

Estrutura formada pela deposição de estéreis, portanto, sem planejamento, ordem ou controle.

2.6 Deposição de estéril

Descarte do estéril, de forma não controlada, ordenada ou planejada.

2.7 Desativação do sistema de disposição de estéril

Fase na qual o depósito de estéril não é utilizado para novas disposições, por esgotamento de sua capacidade ou por motivos outros, permanecendo os compromissos de manutenção e controle sobre o sistema.

2.8 Disposição de estéril

Colocação metódica do estéril seguindo uma ordem de subsequência previamente definida, planejada e controlada.

2.9 Efluente do sistema de disposição de estéril

Fração líquida que retorna ao meio ambiente por via superficial e/ou subterrânea, após passar pelo sistema.

2.10 Estéril de mina

Todo e qualquer material descartado na operação de lavra, em caráter definitivo ou temporário, como não sendo minério.

2.11 Estéril inerte

Qualquer resíduo que, quando amostrado de forma representativa a um contato estático ou dinâmico com a água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10006, não tiver nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor.

2.12 Estéril temporário

Estrutura formada pelo lançamento de estéril ou minério de qualidade marginal, não destinado ao aproveitamento imediato.

2.13 Ganga

Minerais sem valor ou com pequeno valor econômico, que ocorrem agregados ao mineral-minério.

2.14 Mineral industrial

Agregado mineral utilizado sem transformação química na construção civil ou processos industriais.

2.15 Mineral-minério

Espécie de mineral da qual podem-se extrair economicamente metais ou substâncias minerais.

2.16 Minério

Agregado de mineral-minério e ganga que, no estado atual da técnica, pode ser normalmente utilizado para extração econômica de um ou mais metais.

2.17 Pilha de estéril

Estrutura formada pela disposição de estéril.

2.18 Rejeito de mina

Termo inadequado (ver Estéril de mina).

2.19 Relação estéril/minério

Relação entre o volume de estéril e a massa de minério a ser minerado (preferencialmente na unidade m³/t).

2.20 Taxa de disposição de estéril

Quantidade de estéril (preferencialmente em metros cúbicos) disposta em determinada unidade de tempo.

2.21 Vida útil

Período de utilização da pilha de estéril, excluída a fase de abandono.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo a Deliberação Normativa COPAM nº 87 de 17 de julho de 2005 no artigo 1º inciso VIII define estéril como o material descartado, retirado durante o processo de lavra do minério.

A Norma Reguladora de Mineração – 19 (NRM-19, DNPM) concebe que o estéril, rejeitos e produtos devem ser definidos de acordo com a composição mineralógica da jazida, as condições de mercado, a economicidade do empreendimento e sob a ótica das tecnologias disponíveis de beneficiamento, sendo previsto no Plano de Lavra (PL).

A norma ABNT NBR 13029 (2006) fixa as condições exigíveis para elaboração e apresentação de projeto de disposição de pilha de estéril em mineração, gerado na lavra a céu aberto ou subterrâneo, visando a atender as condições de segurança, higiene, operacionalidade, economicidade, abandono e minimização dos impactos ao meio ambiente, dentro dos padrões legais. Logo o estéril da mina é todo e qualquer material descartado na operação de lavra, em caráter definitivo ou temporário, como não sendo minério.

O Projeto de Lei nº 1181 de 2003 estabelece diretrizes para verificação da segurança de barragens de cursos de água para quaisquer fins e para aterros de contenção de resíduos líquidos industriais. No artigo 2º a implantação de barragem de curso de água para quaisquer fins e de aterro destinado a conter depósitos de rejeitos líquidos industriais, em todo o território nacional, só será permitida com base em estudos e projetos que contemplem, no mínimo:

- I. a previsão da vazão máxima de enchente, considerando período de recorrência mínimo de cem anos;
- II. o estudo geotécnico da área em que será implantada a barragem ou aterro;
- III. a previsão de vertedor de fuga ou outro sistema de extravasor capaz de escoar a vazão máxima de enchente sem comprometer a estabilidade da barragem ou aterro;
- IV. a verificação da estabilidade da barragem ou aterro quando submetida às condições provocadas pela vazão máxima de enchente;
- V. o detalhamento das fundações, aterros e estruturas que compõem a obra.

A atividade da mineração gera dois tipos principais de resíduos: os estéreis e os rejeitos. Os estéreis são os materiais escavados, gerados pelas atividades de extração (ou lavra) no decapeamento da mina, não têm valor econômico e ficam geralmente dispostos em pilhas, geralmente encontra-se em condição seca. Os rejeitos são resíduos resultantes dos processos de beneficiamento a que são submetidas às substâncias minerais onde devido ao processo úmido na moagem produz um material lamoso, necessitando a construção de barramento para retenção do rejeito (Silva et al., 2011).

As pilhas de estéril constituem uma das maiores estruturas geotécnicas feitas pelo homem, sendo de fundamental importância sua gestão. Os custos associados a essas estruturas normalmente representam parcela significativa nos gastos de uma mina (Couzens et al., 1985). As atividades de planejar, projetar e construir pilhas de estéril são de responsabilidade da empresa de mineração. O planejamento é constituído de etapas como a exploração, o projeto de pré-viabilidade, o projeto de viabilidade, o projeto básico e executivo. De forma geral, os principais dados são obtidos nas fases iniciais da exploração da mina (Eaton et al., 2005).

De acordo com Adones et al., (2015) é da responsabilidade do planejamento de longo prazo dentro das diretrizes estratégicas dos planos de lavra, elaborar os projetos detalhados das pilhas de disposição de estéril, bem como o sequenciamento. A partir dos dados e premissas básicas do longo prazo, é levantado os quantitativos referentes ao projeto final de lavra e do sequencial. Estima-se os volumes e tipos de estéril a serem empilhados, como também se determina empolamento de cada material, para ajuste da configuração projetada da pilha. O estéril temporário (minério marginal) deve ficar preferencialmente próximo da usina de beneficiamento para em caso de retomada reduzir a distância de transporte. Após estes procedimentos é projetado pilhas que possuam capacidade para atender às necessidades levantadas, contemplando as drenagens e acessos. Define-se uma trajetória que resulte em menor distância de transporte, entre o ponto de origem e destino do estéril. Os dados básicos informados pelo longo prazo são localização, início de operação, dimensões, características geométricas, métodos de transporte. Há algumas condições específicas, ou seja, dispor o estéril dentro da cava ou o mais próximo possível, preferencialmente em áreas já degradadas.

Assim, a opção de determinado local para a construção da pilha de estéril envolve aspectos econômicos, técnico e ambiental. Esses aspectos devem ser analisados independentes

para posteriormente inter-relacionado, para maximizar a segurança e mitigar os impactos ambientais. A importância de um aspecto depende fundamentalmente da avaliação dos demais (Bohnet et al., 1985).

O material direcionado para a pilha de estéril pode ser oriundo do decapeamento dos acessos, das instalações de beneficiamento, escritórios e alojamentos, como dos canteiros de obras e depósitos, das estruturas auxiliares como canal extravasor, canal perimetral, escavação das valas de drenagem, dreno interno e da fundação do dique de sedimentos e *sump*, como também da frente da lavra da mina a céu aberto ou subterrâneo de acordo com o planejamento estabelecido. O volume relativo, ou seja, o volume de rochas estéreis que é indispensável sua remoção por unidade de mineral útil (relação estéril/minério) se denomina coeficiente de decapeamento. A norma ABNT NBR 9061 (1985) fixa as condições de segurança exigíveis a serem observadas na elaboração do projeto e execução de escavações de obras civis, a céu aberto, em solos e rochas.

A pilha de estéril com material de decapeamento, indicado por Bates (2003), poderão consistir de ampla variedade de materiais, tendo propriedades muito diferentes como exemplo de areia, cascalho e rocha fragmentada. Material perigoso e passível de gerar instabilidade como solo pantanoso, solo colapsível, compressível e expansível devem receber tratamento especial. Da mesma forma as misturas de solo estável e instável devem ser tratadas como se fosse totalmente instável. A construção deve iniciar pela parte inferior com material relativamente seco e empilhar para formar plataformas. Assim o espalhamento e adensamento ocasiona pequeno ângulo global de talude. O método ideal para se construir esse tipo de pilha é através do uso de tratores e unidade escavo-empurradora. É recomendado não ultrapassar a altura de 6 metros do material empilhado, caso contrário necessita de autorização do responsável técnico. No caso do material do decapeamento estiver muito úmido deverá ser empilhado separadamente para propiciar a secagem ao ar livre e ser espalhado em camadas finas sobre pilha.

O depósito de resíduo de rocha normalmente é heterogêneo em termos de tamanho e estrutura do grão. A fragmentação da rocha é produto do número e tipo de processo mecânico, como perfuração, detonação, carregamento e transporte. Consequentemente, o depósito de pedra pode variar em tamanho de partículas de argila até pedregulho. Logo a triagem ocorre naturalmente pela gravidade no material derramado do caminhão de transporte na face da pilha de estéril pode resultar numa distribuição granulométrica vertical, onde

material mais fino tende a permanecer perto do topo e material grosseiro tende a rolar para baixo, no sentido do pé do despejo.

A maneira pela qual o depósito de resíduo de rocha ou decapeamento é concebido e construído pode resultar em estruturas com diferenças significativas entre si. Comumente a construção do aterro da pilha progride por adição horizontal do material no topo em camada sucessiva até alcançar o limite da área e atingir a cota pré-estabelecida em projeto. Dependendo da condição e geomorfológica do terreno, a fim de melhorar a estabilidade e minimizar a liberação de sedimentos de finos no meio ambiente, é executado vala para implantação de dreno francês que pode variar na combinação com areia fina, brita e enrocamento para permitir a transmissão do fluxo dos finos sob a pilha de estéril, prevendo-se a colmatção do dreno no dimensionamento.

Para Eaton et al., (2005) a disposição da pilha de estéril deve ser feita correntemente por meio de camadas espessas, formando uma sucessão de plataforma de lançamento espaçada com intervalo de 10 metros ou mais. A estabilidade da pilha pode aumentar, controlando a largura, o comprimento e o espaçamento das plataformas, com recurso da berma como acesso para os equipamentos, execução de um sistema de drenagem superficial e controle da erosão pela proteção vegetal, além de suavizar a inclinação do talude geral.

Consoante a McCarte (1990), as pilhas frequentemente alcançam áreas extensas e determinados cuidados necessitam ser estabelecidos para controlar o escoamento superficial. A água superficial deve ser direcionada de modo a impedir a saturação dos taludes, para evitar o desenvolvimento de superfície freática dentro da pilha de estéril, para proteger a estrutura contra a perda de finos por *piping*, além de minimizar erosões e rupturas por fluxo de água na face externa do talude. A água pluvial deve ser coletada e encaminhada para o sistema de canal de drenagem superficial.

O plano superficial da plataforma de disposição da pilha de estéril deve ter um caimento entre 1% e 2% a partir da crista para favorecer o direcionamento da água coletada até o sistema de drenagem superficial mais próximo, para plataformas à jusante. A opção de adotar enrocamento como dreno de fundo é alternativa viável e exequível nos canais de desvios da superfície, os quais são de construção onerosa e de difícil manutenção. Segundo Eaton et al., (2005), o dreno de fundo de enrocamento é aceitável no caso de fluxo de até 20m³/s. Em conformidade com Saliba et al., (2010) os drenos compostos por enrocamento são

estruturas geotécnicas que precisam atender a requisitos de projetos de engenharia. A experiência demonstra que o método construtivo é fator determinante da geometria da seção do dreno. Em qualquer caso, o dreno deve ser executado no sentido de montante para jusante, protegendo-se a saída exposta ao final do período de trabalho de forma que eventos pluviométricos não provoquem a contaminação do núcleo no período de descanso. Na ampla maioria dos casos, a seção transversal do dreno possui geometria trapezoidal com inclinação do talude de 1Vertical:1,3Horizontal. Contudo, deve atender a um conjunto de requisitos práticos, listados abaixo:

- O dreno deve ser instalado em áreas com fundação estável e não erodível. No caso de drenos fundados em solo, deverão ser interpostas em camadas de filtro e transição entre o solo e o material de dreno (blocos de rocha ou cascalho);
- O material do dreno deve ser durável. Em geral, os materiais adequados à construção de *rip-rap* são adequados à construção de drenos;
- O dreno deverá ser coberto com materiais de transição e filtro para evitar a colmatção por materiais finos provenientes do estéril, de forma a garantir o funcionamento a longo prazo;
- A fundação da pilha de estéril, nas laterais do dreno, também deve apresentar boa estabilidade, de modo a evitar que o dreno tenha seção interrompida por deformação excessiva, ou mesmo ruptura, e tal acontecimento venha a comprometer a capacidade drenante a longo prazo;
- Deve-se garantir que a rocha utilizada na construção dos drenos seja isenta de minerais potencialmente geradores de drenagem ácida, ou sujeitos à ciclagem;
- A construção de drenos deve ocorrer durante o período de seca, de forma a evitar a contaminação do dreno por material fino;
- A fundação do dreno, seja constituída por solo ou granular, deverá ser compactada moderadamente, para apresentar uma permeabilidade moderada;

- O material do dreno poderá ser colocado com retroescavadeira ou basculado diretamente do próprio caminhão e espalhado com trator de esteiras. Em geral, uma compactação executada com passadas do trator de esteiras (tipo CAT D8 ou similar) é suficiente;
- A largura mínima do corpo do dreno deverá ser igual a 3,0m para atender requisitos construtivos, pois esta é a largura mínima necessária para o tráfego de escavadeira, responsável pela disposição dos materiais de montante para jusante, usando o próprio dreno como acesso.

Na pilha de estéril os principais custos de disposição estão concentrados nas seguintes atividades: drenagem, proteção vegetal, retenção de finos gerados por carreamento de sólidos durante e após a formação da pilha, manutenção ao longo dos anos e transporte do estéril. E de todas estas atividades enumeradas, o mais expressivo é o transporte, estando este dependente basicamente dos equipamentos e perfis de transporte (Franco, 1991).

Além disso, este mesmo autor relata que problemas envolvendo custos de manutenção podem gerar valores extremamente significativos ao final da vida útil do depósito, onde a saturação do maciço devida à inexistência de sistemas de drenagem interna e superficial adequados, associada à alta compressibilidade do material disposto conferida pelo lançamento de grandes espessuras, tem gerado grandes deformações e instabilidades generalizadas.

Consequentemente as características hidráulicas são propriedades difíceis de ser estimadas, todavia, são de suma importância para o entendimento dos sistemas de fluxo no interior da pilha, sendo em muitas situações as principais responsáveis por problemas de estabilidade e transporte de contaminantes. Dentre os fatores que influenciam as características hidráulicas das pilhas de estéril pode-se citar como os de maior relevância: a litologia do estéril, métodos de remoção e disposição, tráfego de máquinas e caminhões sobre a pilha, superfície topográfica, direção e mergulho das camadas sotopostas à pilha, idade do estéril e as propriedades físicas e químicas do material estéril.

Segundo Caruccio et al. (1984), estes sistemas de escoamento na subsuperfície podem apresentar características de escoamento completamente distintas, similar ao escoamento em um sistema cárstico, nos quais a água percola por grandes vazios e condutos em regime turbulento ou similar ao escoamento por um meio pouco fraturado de um embasamento rochoso.

Outro fato observado por Phelps (1983) aponta para uma redução generalizada da densidade do material estéril em razão do aumento da profundidade da pilha. Esta ocorrência é justificada pela criação de vazios intersticiais decorrentes do deslizamento de fragmentos maiores para a base da pilha de estéril, formando grandes lacunas e vazios entre esses grandes fragmentos de estéril.

Groenewold et al., (1977) observaram que pilhas de estéril de alta transmissividade dispostas sobre superfícies formadas por vales são mais susceptíveis à subsidência, devido à ocorrência do fenômeno denominado *pipping*, no qual os materiais estéreis granulares finos são carreados em razão do aumento da velocidade da água existente no interior das pilhas.

Contudo, o cuidado no processo de operação e manutenção da pilha estéril vai além da estabilidade geotécnica, considerando que a mesma encontra-se exposta e vulnerável a condições de oxidação, percolação, lixiviação e erosão (Robertson et al., 1985). Diante disso, a variação do nível de água e zona de flutuação do lençol freático, pode ocorrer reação química e física na região saturada e não saturada do estéril, ocasionando a geração de drenagem ácida (Hawkins, 1998), gerando transporte de contaminantes. Nesse contexto, Robertson et al. (1985) indica que medidas de controle e prevenção ao aporte de água no maciço das pilhas com potencial de contaminação são mais eficazes que o próprio controle na saída da água contaminada.

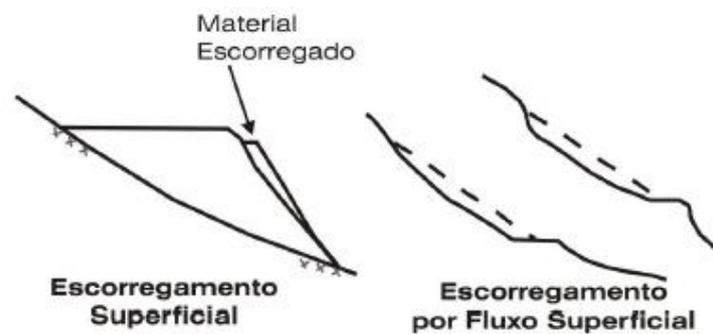
Entretanto, salienta-se que caso a execução da disposição da pilha de estéril não seja feita dentro das recomendações técnicas das normas e órgão regulamentador pode apresentar um cenário favorável à ocorrência de passivos ambientais, como no caso de deslizamento, carreamento de sólidos para cursos de água e contaminação de solos e aquíferos. Fatores como a topografia da região, intensidade de variáveis climatológicas, tais como precipitação e vento, além das características físicas e químicas do material estéril poderão ainda gerar danos ambientais de alta complexidade. Grande parte dos problemas de instabilidade geotécnica de taludes de pilhas de estéril, vivenciados por muitas mineradoras, são oriundos do desaguamento inadequado da água superficial e de subsuperfície.

Para Caldwell et al., (1981), o plano de operação da pilha envolve avaliação da estabilidade e de falha de risco. Assim, os tipos de instabilidades da pilha de estéril depende:

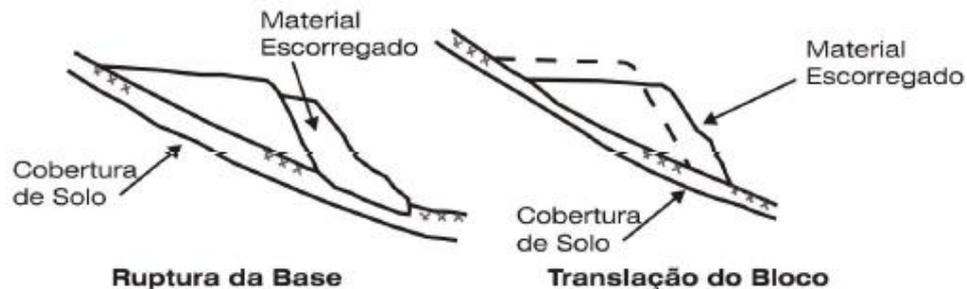
- Do método usado na construção da pilha
- Da topografia do local

- Da condição da fundação
- Da característica física do resíduo de rocha e decapeamento
- Do nível d'água e poro pressão que desenvolve na pilha

Para exemplificar o possível cenário de deslizamento, é apresentado os modos de ruptura geralmente causados por influencia da água em pilha de estéril descritos por Caldwell et al., (1981), conforme apresentado na Figura 3.1 abaixo. Esses dois processos podem ser enumerados como possíveis agentes causadores da ruptura: elevação da superfície freática no maciço das pilhas e saturação do talude e fluxo superficial paralelo a sua face.



Parte da borda do talude se move para baixo, iniciado a partir da crista da pilha. A saturação desta região associada ao fluxo paralelo a face do talude são condicionantes para a ocorrência deste tipo de ruptura.



Geralmente ocorre quando a pilha é formada em um terreno inclinado sob uma camada pouco espessa de solo de baixa resistência. O início da ruptura ocorre devido ao aumento dos níveis freáticos no aterro, por processos de terremoto ou devido à deterioração de materiais orgânicos.

Figura 3.1 – Modos de ruptura em pilhas de estéril

Fonte: Adaptado de Caldwell et al. (1981)

De forma geral, o fluxo da água é frequentemente iniciado pela chuva, ao infiltrar na superfície pode saturar a pilha e fornece água aos vazios nos poros. A profundidade da saturação depende da permeabilidade do solo, porosidade, grau de saturação e disponibilidade de fornecimento de água. Segundo Caldwell et al., (1981), o fluxo de escorregamento ocorre devido ao cisalhamento do talude com colapso da estrutura. O escorregamento da fundação é

um fenômeno de deformação ao qual um corpo está sujeito quando as forças que agem provocam deslocamento em planos diferentes na interface abaixo da pilha de estéril. Se o movimento da fundação é profundo e de rotação, a ruptura do talude é descrita como afundamento. No despejo pela extremidade com condição de carga rápida pode resultar no desenvolvimento de excesso de pressão neutra nos solos da fundação e causar uma cunha de ruptura, como também deslocar o pé do talude que pode envolver solo raso da fundação. O desenvolvimento do excesso de poro pressão depende do grau de saturação, permeabilidade do material da base e da taxa de avanço da pilha. Se a carga exceder a resistência ao cisalhamento devido ao acúmulo de poro pressão o pé do talude irá desmoronar. Geralmente a encosta estabiliza após um período de tempo. Para retomar o alteamento da pilha a altura de despejo e taxa de avanço necessita de ser reduzida, para dar tempo de eliminar as pressões neutras. A argila da base saturada não é viável para limitar as taxas de alteamento da pilha e evitar condição de carga não drenada. Além disso, não é prática comum para construir pista de acesso de despejo rápido o suficiente para desenvolver excesso de poro pressão na fundação de areia. A taxa de avanço da pilha apoiada sobre material siltoso pode ser crucial para a estabilidade da fundação.

Ainda para o mesmo autor, a pilha de estéril locado em encosta íngreme pode transformar em longo contato entre o aterro e a fundação. Este deslizamento pode ocorrer durante a construção por causa da declividade da fundação ou pode iniciar mais tarde pela existência de material orgânico, terremoto, derretimento de neve e ocorrência de água subterrânea. A inclinação natural do solo determina o potencial para a consequência do deslizamento. Como a inclinação da fundação aumenta o mesmo acontece com o potencial de deslizamento e a potenciais áreas de impacto do escorregamento.

A pilha de estéril pode ser distinguida dos outros tipos de obras de engenharias pela variabilidade dos materiais e ausência de controle na construção da granulometria e densidade. Por causa dessas condições Vandrey (1981), sugere que valor de resistência do cisalhamento pode ser atribuído para a pilha ao avaliar a estabilidade do talude. A utilização da resistência ao cisalhamento é facultada ao pico da força, porque é relativamente menos sensível às condições locais. O pico de intensidade é fortemente influenciado pela densidade, granulometria e deformação. O ângulo de atrito do material pode ser considerado um ângulo limite de resistência ao cisalhamento resultante do deslizamento, para o ângulo de repouso, como o residual em testes em laboratório é um valor limite.

O formato da pilha de estéril esta diretamente relacionada e interdependente da geomorfologia do terreno que é um conhecimento específico, sistematizado, que tem por objetivo analisar as formas do relevo, buscando compreender os processos pretéritos e atuais. Como componente disciplinar da temática geográfica, a geomorfologia constitui importante subsídio para a apropriação racional do relevo, como recurso ou suporte, considerando a conversão das propriedades geoecológicas em sócio-reprodutoras para Kügler (1976), caracteriza as funções sócio-reprodutoras em suporte e recurso do homem. Estas informações são levantadas na topografia que é definida na norma ABNT NBR 13133 (1994) como conjunto de métodos e processos que, através de medições de ângulos horizontais e verticais, de distâncias horizontais, verticais e inclinadas, com instrumental adequado à exatidão pretendida, primordialmente, implanta e materializa pontos de apoio no terreno, determinando suas coordenadas topográficas. A estes pontos se relacionam os pontos de detalhes visando à sua exata representação planimétrica numa escala predeterminada e à sua representação altimétrica por intermédio de curvas de nível, com equidistância também predeterminada com pontos cotados.

Abaixo é apresentado um sistema de classificação da BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, (1991), onde proporciona descrições básicas das pilhas de estéreis como também o seu tipo e a sua configuração. Além disso, as descrições frequentemente fornecem uma previsão sobre o comportamento interno da pilha como poro pressão, nível de água, tendência de escoamento superficial da água, para prevenir problemas potenciais, com o intuito de ser investigados na fase de projeto.

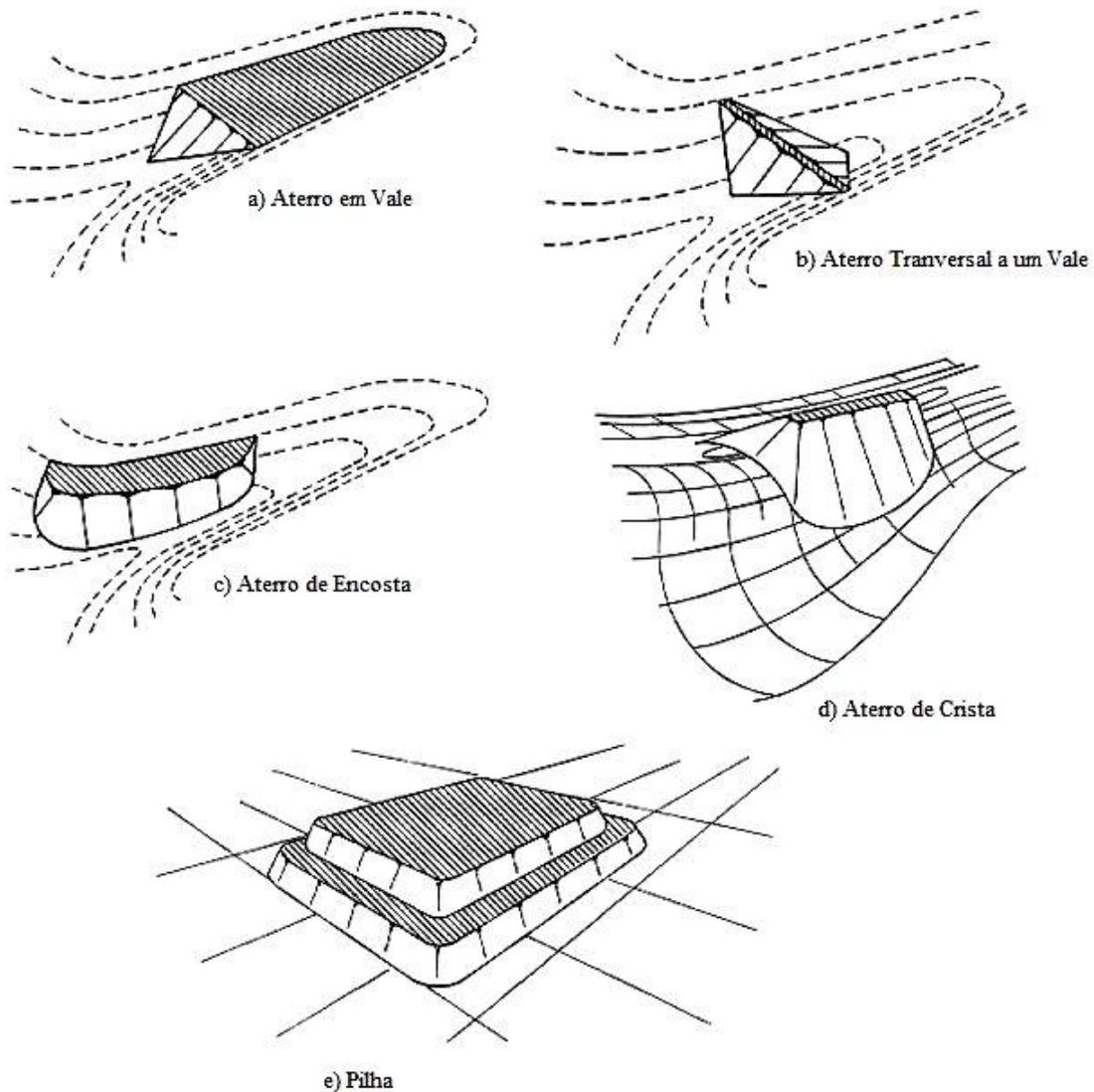


Figura 3.2 – Tipos de pilhas de estéril

Fonte: Modificado de BC Mine Waste Rock Pile Research Committee (1991)

De forma geral, como é possível observar a configuração e as dimensões da pilha tem uma relação direta com a estabilidade. A altura da pilha, por exemplo, está ligada à carga que será exercida sobre um determinado terreno de fundação. As variáveis geométricas primárias são a altura, o volume e a inclinação geral do talude. Em relação à inclinação do terreno de fundação e o grau de confinamento, a situação mais favorável é a formação côncava dos taludes em vale fechado ou confinamento tridimensional, já a menos favorável seria uma formação convexa dos taludes de fundação como no caso de aterros de crista. As condições de fundação são fatores-chave na estabilidade geral da pilha, e a causa mais comum de ruptura. Nesse sentido, classificam-se as fundações em competente (fundação igual ou mais resistente que o aterro), intermediária (resistência entre competente e fraca) e fraca

(capacidade de suporte limitada). As características do material do aterro, como textura, resistência ao cisalhamento e durabilidade são também muito importantes em relação à estabilidade da pilha. Os materiais mais favoráveis são aqueles constituídos por materiais grosseiros, de rocha dura e durável, com pouco ou nenhum fino. Os menos favoráveis são materiais de decapeamento ou rocha muito intemperizada com grande percentagem de finos. As condições piezométricas e climáticas são outros fatores importantes para estabilidade, sabendo-se que a água pode entrar no aterro, seja por infiltração direta, água superficial, ou como percolação subterrânea. Uma situação de desenvolvimento de freática dentro do aterro, por exemplo, será sempre uma condição adversa. Alta taxa do alteamento da pilha pode resultar em geração de excesso de poro pressão, contribuindo para a instabilidade, além de dificultar o adensamento do material. A sismicidade natural, causada por abalo sísmico no Brasil geralmente é baixa, mas as vibrações causadas por desmonte de rocha pode ser um fator a ser considerado.

A inclinação do terreno e o grau de confinamento determinam o formato e estabilidade da pilha de estéril conforme Blight (1981). A fundação com declividade íngreme e ou falta de confinamento são considerados fatores contribuintes nas falhas. A situação menos desejável é a que o ângulo de inclinação aumenta em direção ao pé do talude como a convexa. A situação mais favorável é a inclinação decrescente para o pé do talude como a côncava com confinamento tridimensional encaixado no vale. Onde o vale é sinuoso o material é contido pela parede do vale na direção do movimento. A condição da fundação é geralmente reconhecida como fator chave na estabilidade da pilha para Caldwell (1981). A má condição da fundação é citada como a causa mais frequente de instabilidade nesse tipo de obra. Contudo, é diferenciado em três categorias: competente, intermediário e fraco. O primeiro possui alicerces altamente competente ou solo de resistência igual ou maior do que o material da pilha, insensível a geração de poro pressão ou aumento do carregamento. O maciço intermediário se consolida e ganha resistência com o tempo, mas pode ficar sujeito à geração de poro pressão e carregamento muito rápido. Por fim, o maciço fraco não pode ser carregado com segurança além da capacidade suporte definido em laboratório, com risco no carregamento com alta taxa.

A experiência na execução da pilha de estéril e avanço da crista influencia vários engenheiros segundo Golder Associates (1987). A taxa elevada no alteamento é considerada um fator que contribui para várias falhas da estrutura. De tal forma que pode gerar pressão em excesso nos poros. Contudo, é possível controlar a pressão intersticial com monitoramento

durante a construção, para assegurar que o excesso de poro pressão seja efetivamente dissipado e a estabilidade seja mantida. A resistência ao cisalhamento do material empilhado é influenciada pela densidade. Logo, quando o material residual é feito com avanço rápido pode não ter oportunidade para consolidar e desenvolver a resistência para garantir a estabilidade.

O potencial para taxas de geração e dissipação da pressão dos poros devem ser avaliados, e os resultados incorporados em análise do projeto. Em fundação com material que são particularmente suscetível á geração adversa pressão de poros incluem solos de granulometria fina, lavra suavizadas e, em alguns casos, até densas. A incorporação de gelo ou neve na pilha pode resultar na formação de lençóis freáticos empoleirados e desenvolvimento de instabilidade devido a alta pressão da água. Algumas falhas de despejo têm sido atribuídas a concentrações residuais de neve e gelo do inverno anterior, em combinação com tamanhos de rocha relativamente fina. Assim, a informação climática, deve ser analisada e deve considerar-se o ponto de acumulação de neve potencial sobre superfície úmida, especialmente nos aspectos de sotavento dos locais de despejo.

As propriedades do material da pilha como granulometria, resistência ao cisalhamento, ângulo de atrito, coesão, saturação, durabilidade e outros também são conhecidos como fatores chaves para a estabilidade global da pilha de estéril para Blight (1981). Muitas das falhas são originadas pela má qualidade do material direcionado para o despejo como um fator de instabilidade. O material mais favorável é composto por grão duro com pouco ou nenhum grão fino. O material mais desfavorável é oriundo de decapeamento ou rocha mole com alto teor de alteração e fortemente intemperizado.

As condições piezométricas da fundação da pilha e dentro do mesmo pode afetar a estabilidade segundo Caldwell (1981). As condições climáticas nomeadamente precipitação de chuva e neve pode ter influência direta nas características piezométricas. Um estado crítico pode ser desenvolvido quando uma superfície freática dentro da pilha intercepta uma inclinação igual ou próxima ao ângulo de repouso da fundação. A água pode penetrar na pilha quer por infiltração direta, quer por fluxo no terreno natural, quer por infiltração da água subterrânea. O influxo potencial da condição da água e propriedade piezométrica dentro da pilha de estéril deve ser abalisada com base na informação hidrogeológica e hidrológica, obtida durante estudo de campo e propriedade avaliada. Onde o estudo indicar o

desenvolvimento de superfície freática dentro do despejo é recomendado o sistema de modelagem de fluxo das águas subterrâneas.

Os possíveis efeitos de terremotos sobre a estabilidade da pilha de estéril é discutida por Caldwell (1981). O impacto mais significativo sobre a estabilidade devido a terremoto parece ser potencial de liquefação de material de fundação sensível, no entanto o material da pilha de despejo com grão fino saturado também podem estar sujeito a liquefação. É também concebível que movimento dinâmico da terra induzida por jateamento nas proximidades associado com a mineração pode afetar a estabilidade da pilha. A norma ABNT NBR 15421 (2006) contempla requisitos exigíveis para verificação de segurança das estruturas usuais da construção civil relativamente às ações de sismos e os critérios de quantificação destas ações, as resistências a serem consideradas no projeto das estruturas de edificações, independente quais sejam sua classe e destino.

A estabilidade da pilha de estéril e o desenvolvimento de condições que poderiam levar ao fracasso também esta relacionada com a forma como a estrutura é construída para Golder Associates (1987). Geralmente é construído em uma serie de elevações ou plataforma em sequência ascendente ou descendente. O método de construção ascendente é vantajoso e indicado na norma ABNT NBR 13029 (1993) pelo fato do alteamento ser ancorado no nível anterior combinado com distância de transporte minimizado, acessibilidade e capacidade de armazenamento disponível. A estabilidade pode ser melhorada através do uso de embrulhos de geotêxtil, terraceamento para restringir a altura da elevação para limitar as tensões de cisalhamento apoiado nas ombreiras do vale para fornecer o confinamento com a devida drenagem interna necessária. Como indicado na figura 3.3.

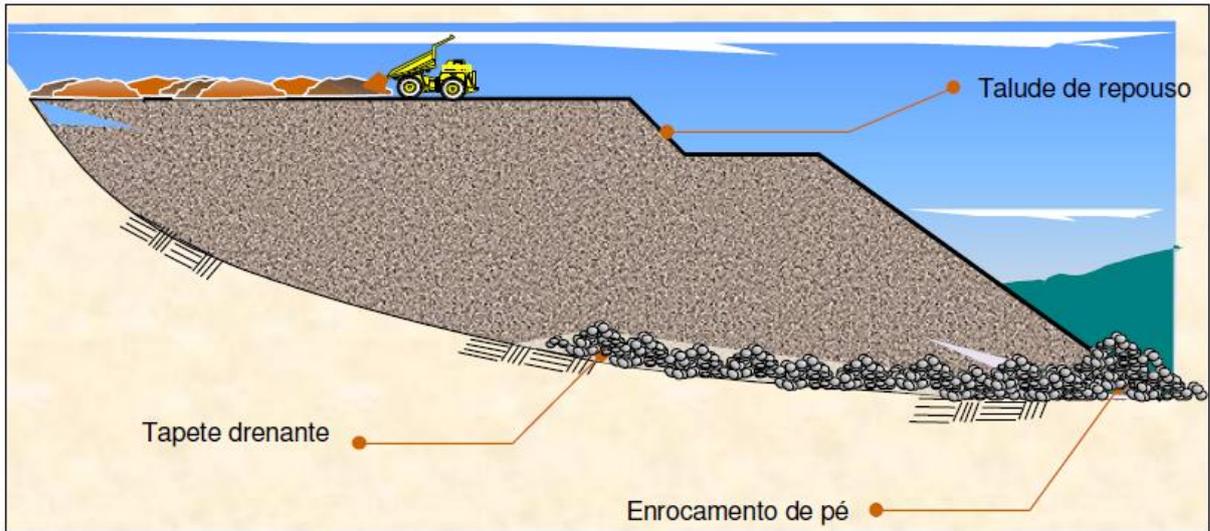


Figura 3.3 – Método ascendente

Fonte: Apostila sobre formação de depósito de estéril e rejeito (2000)

O método descendente é executado com o lançamento do material na ponta da pilha sem planejamento, sem ordem ou controle, apresenta em toda a estrutura ausência de compactação e sem preparo da fundação. Este método é aparentemente mais econômico, porém não atende as condições mínimas de segurança com alto potencial de escorregamento e geração de dano ao meio ambiente. Apesar de reduzir a distância média de transporte o sistema de drenagem torna-se inadequado com risco de rompimento devido à saturação do material exposto e sem embriçamento. Além disso, a falta da proteção superficial sem controle geométrico acelera as condições de erosão conforme a figura 3.4.



Figura 3.4 – Método descendente

Fonte: Apostila sobre formação de depósito de estéril e rejeito (2000)

A geometria da pilha é amparada na norma ABNT NBR 13029 (1993), a qual aconselha projetar maciço com altura até 200 metros, devido dificuldade e custos operacionais elevados na execução, caso haja necessidade de alteamento maior é necessário estudo minucioso do sequenciamento. A altura máxima entre bermas não deve exceder 10 metros para facilitar a implantação, manutenção e proteção do talude para redução do risco de geração de trinca e futura ruptura. Adones et al., (2015) recomenda a inclinação do talude entre bermas próximo a 2 Horizontal:1 Vertical, aproximadamente $26,6^\circ$, de forma a garantir a implantação da proteção superficial do talude para evitar erosão. A mesma norma recomenda a berma com largura de 6 metros para proporcionar o acesso para a manutenção e tráfego dos maquinários, além de favorecer a segurança da estabilidade, com a declividade longitudinal mínima de 1% e declividade transversal mínima de 5% para assegurar o escoamento superficial. Também aborda o acesso para manutenção incorporado na pilha de estéril com interligação integrada ao sistema viário da mina e estruturas adjacentes.

4 Procedimentos

Este capítulo expõe os procedimentos técnicos para a execução do projeto da pilha de estéril, baseado em normas técnicas, especificações e recomendações extraídas da experiência de empreendimentos nacionais e internacionais.

4.1 Investigação geotécnica

É de extrema importância para o sucesso da execução da pilha de estéril uma boa programação de investigação geológica e geotécnica para identificação dos fatores condicionantes da fundação da estrutura como solo laterítico, solo saprolítico, existência de rocha e matacão, presença de zonas cársticas, camada hidrogeologia, plano de falha e fratura, com as devidas propriedades de engenharia como resistência, compressibilidade e permeabilidade, com ênfase na verificação se o maciço da fundação possui capacidade de suportar a pilha de estéril.

4.2 Desmatamento

As áreas a serem desmatadas e limpas correspondem àquelas em que se realizarão as escavações programadas ou as que serão utilizadas como bota-fora ou destinadas à estocagem. A limpeza inclui, onde necessário, as operações de desmatamento, destocamento e remoção de detritos de origem vegetal, de forma que a superfície resultante se apresente completamente livre de qualquer material inadequado. O material removido na operação de limpeza deverá ser transportado para locais previamente indicados pela fiscalização. Os bota-foras serão utilizados e conservados de forma tal que não interfiram com as operações de construção.

O limite da área a ser limpa pode estender além das linhas de demarcação das escavações, desde que solicitado e/ou previamente autorizado pela fiscalização, de forma a garantir acabamento adequado às áreas sujeitas às operações de limpeza. O acabamento das áreas sujeitas às operações de limpeza consiste na regularização do terreno, de forma a evitar a formação de depressões onde possa haver acúmulo de água e garantir superfícies finais uniformes, com taludes estáveis, bem como possibilitar drenagem adequada no local.

O desmatamento refere-se à derrubada, remoção e transporte de todas as árvores e arbustos, capoeiras e macegas existentes na área. O destocamento corresponde à remoção dos

tocos e raízes existentes na área designada pela fiscalização. Sempre que possível, o material aproveitável proveniente das operações de limpeza, desmatamento ou escavação deverá ser utilizado na construção de obras temporárias ou permanentes, de acordo com determinação ou aprovação do geotécnico. Em nenhuma hipótese, será permitido o lançamento de galhos, troncos, raízes e detritos no leito de cursos d'água perenes ou intermitentes.

A operação de limpeza terá um avanço físico compatível com as obras envolvidas e atenção especial deve ser dada as áreas susceptíveis a erosão depois de desmatadas, quando expostas por tempo prolongado ao intemperismo. Nenhum movimento de terra poderá ser iniciado enquanto as operações de limpeza e remoção das áreas de interesse não estiverem totalmente concluídas. Após a conclusão dos serviços de limpeza e remoção, estes ficarão sujeitos à aprovação e liberação pela fiscalização. Somente então se dará início a quaisquer outros serviços na área.

4.3 Escavação

A norma ABNT NBR 9061 (1985) fixa as condições de segurança exigíveis a serem observadas na elaboração do projeto e execução de escavações de obras civis, a céu aberto, em solos e rochas.

A norma ABNT NBR 9732 (1987) tem como objetivo mostrar as condições para projeto de terraplenagem para rodovias, incluindo as fases de projetos básico e executivo. Baseado na longa experiência brasileira é definido três categorias de materiais:

- Material de 1ª categoria: compreendem os solos em geral, de natureza residual ou sedimentar, seixos rolados ou não, e rochas em adiantado estado de decomposição, com fragmentos de diâmetro máximo inferior a 0,15 m, qualquer que seja o teor de umidade apresentado. Compreendem ainda as pedras soltas, rochas fraturadas em blocos maciços de volume inferior a 0,5 m³, rochas de resistência inferior a do granito (rochas brandas). A escavação destes materiais envolve o emprego de equipamento convencional de terraplenagem;

- Material de 2ª categoria: compreendem os materiais cuja extração exija o uso combinado de escarificador pesado e explosivos, incluindo-se os blocos maciços de volume inferior a 2 m³;
- Material de 3ª categoria: compreendem os materiais com resistência ao desmonte mecânico igual ou superior a do granito são blocos de rocha com diâmetro superior a 1m, ou de volume igual ou superior a 2 m³, cuja extração e redução, a fim de possibilitar o carregamento, se processem somente com o emprego contínuo de explosivos.

As escavações devem seguir os alinhamentos, declividades e dimensões indicadas nos projetos e não poderão ser lançados aterros, ou executada qualquer construção permanente nos locais das fundações. Além disso, deverá ser feita uma drenagem adequada para todas as áreas em fase de escavação, evitando, o acúmulo de água, erosões e desmoronamento de terra, bem como dispor de equipamento para bombeamento e recalque das águas que venham a se acumular nas escavações.

Segundo a norma ABNT NBR 13029 (1993) a localização e as características físicas da pilha devem contemplar as seguintes informações:

- a) A situação da pilha relativamente à bacia e sub-bacia hidrográfica em que esta está localizada;
- b) As características físicas do sítio de disposição (tipo de solo, vegetação, topografia, geologia local), além da densidade populacional, nível e características locais da atividade econômica na área de influência da pilha;
- c) As características hidrometeorológicas e hidrogeológicas local:
 - i. Tipo de clima
 - ii. Pluviometria (valores de precipitação anual e delimitação dos meses secos e chuvosos);
 - iii. Direção preferencial de ventos;
 - iv. Postos de medição hidrometeorológicos e piezômetros instalados e previstos;
 - v. Flutuação do nível d'água subterrâneo.

Para Robertson e Shaw (1999, 2004) a seleção do local para armazenamento de rejeitos e estéril é uma das primeiras etapas que as empresas mineradoras deverão contemplar. Os locais de armazenamento de rejeitos e estéril não oferecem retorno econômico à companhia e requerem controle e conservação durante e depois da etapa de fechamento da mina. Existirão riscos em longo prazo de tipo ambiental e econômico associados a quaisquer estruturas de contenção de rejeitos de mineração. Maximizar segurança e minimizar os custos implica uma avaliação de alternativas de projeto do ponto de vista administrativo de perdas e benefícios. Para isto, é necessário desenvolver três etapas básicas:

- Identificar os impactos
- Quantificar os impactos
- Valorar os impactos

4.4 Fundação

A norma ABNT NBR 13029 (1993) recomenda que deve-se apresentar o mapeamento geológico-geotécnico de campo, os furos (poços, trados e sondagens mecânicas) executados e seções geológico-geotécnicas que elucidem as características da fundação. Deve ser apresentado também um relato interpretativo das seguintes características: permeabilidade, resistência e deformabilidade dos materiais de fundação para as análises de estabilidade e eventuais estudos e percolação. Eventualmente, em locais com condições de fundação francamente favoráveis (por exemplo: rocha são pouco fraturada, solo argiloso muito rijo), que possam ser avaliadas após uma inspeção de campo, podem ser dispensados outros tipos de investigação, sendo, no entanto, necessária à avaliação criteriosa das características dos materiais de fundação para as análises de estabilidade e percolação.

A mesma norma preconiza investigações indiretas e diretas de campo executadas na fundação e fontes de materiais granulares de construção, incluídos os gerados na mineração para o sistema de drenagem. Devem ser apresentados todos os boletins das sondagens, contendo amarração planialtimétrica dos furos ou linhas de investigação indireta, a identificação das empresas executoras dos serviços e os métodos utilizados, como também ensaios de campo, laboratório executados na fundação e em fontes de materiais granulares de construção, incluindo os geradores na mineração. Também apresenta de forma sucinta a

análise e dimensionamento das obras componentes do sistema de disposição de estéril, compreendido em:

- a) Análise de percolação pela fundação e maciço da pilha (quando necessário);
- b) Dimensionamento dos sistemas de drenagem da pilha e das estruturas dos dispositivos de retenção de finos;
- c) Dimensionamento estrutural de obras de concreto, quando existentes.

A superfície da fundação deverá ser limpa de blocos soltos, raspada e compactada, para receber a estrutura principal. A fiscalização pode exigir reparo na superfície final da escavação a fim de corrigir eventuais danos à camada de escavação, caso julgue que esta não esteja em condições de receber pilha de estéril, em virtude da inobservância dos cuidados recomendados em projeto. Para o preparo da fundação, as escavações devem ser feitas até atingir níveis adequados de fundação, do ponto de vista geomecânico. Em todas as superfícies sobre as quais deverá ser lançada a pilha deve ser feita uma limpeza, retirando-se todo material solto. Assim como todas as depressões e sulcos na rocha de fundação devem ser cuidadosamente limpos e isentos de impurezas e de água.

4.5 Instrumentação

A instrumentação para Dunnicliff (1988) é usado durante a construção para garantir a segurança, minimizar os custos da construção, controle de procedimento de construção e planejamento, como também fornecer proteção conveniente, fornecer dados para a medição de quantidades, reforçar as relações públicas e o avanço do estado da arte.

O monitoramento da pilha de estéril com implantação de sistema de instrumentação tem como principal objetivo a obtenção de informações que aumentam o entendimento do comportamento do maciço. A aquisição de dados de instrumentação pode auxiliar na determinação de possíveis superfícies de ruptura e identificação de movimento vertical e horizontal da massa instável. Além disso, é possível monitorar condições de estabilidade do talude da pilha quando submetido a intervenções como escavação ou até mesmo precipitação com controle de poro-pressão e nível d'água, sendo possível utilizar os

dados para validação de medição de controle como exemplo de contenção, drenagem e etc., segundo (Sestrem, 2012).

O controle da pressão da água interna da pilha de estéril através de poços de observação somente é validado quando a poro-pressão cresce uniformemente com a profundidade, de acordo com a variação do lençol freático, onde raramente pode ser assumida. Isso porque essa metodologia gera uma conexão vertical entre as camadas subjacente do solo e pode gerar informações não confiáveis sobre a pressão existente em determinada profundidade. Esse instrumento pode ser bastante útil durante a fase de investigação para desenvolvimento do projeto, porque permite definir o poro-pressão inicial, além de analisar variações sazonais (Dunnicliff, 1988).

A norma ABNT NBR 9061 (1985) que aborda segurança de escavação a céu aberto, cujos cuidados são pertinentes à pilha de estéril, observa que em função do que se pretende monitorar é necessário fixar inicialmente os pontos críticos e elementos a serem medidos, para definição do programa de instrumentação, considerando:

- a) Presença de máquinas e construções vizinhas (fundações, dutos, galerias, etc.);
- b) Complexidade geológica, geotécnica e hidrológica do subsolo;
- c) Característica da obra;
- d) Porte e importância da obra, incluindo o risco de perdas de vidas e propriedades;

O programa de instrumentação, caso necessário, deve acompanhar o projeto da pilha de estéril, devendo apresentar:

- a) Definição dos pontos a serem medidos, do objetivo da instrumentação proposta e dos elementos necessários à interpretação (tempo, cotas, proximidades de rios, etc.);
- b) Localização dos instrumentos (em planta e seção transversal);
- c) Detalhamento dos instrumentos; deve ser levado em consideração:
 - Características físicas do aparelho, incluindo sensor e sistema de medida;
 - Procedimento de instalação;

- Influências externas, como por exemplo: temperatura, corrosão, efeito de vibrações, etc.;
- Processos de cálculo, incluindo o processo numérico empregado e o processo de análise das leituras, para seleção daquelas que vão ser efetivamente utilizadas;
- Cronograma de leituras; a frequência do acompanhamento é função das etapas da escavação, devendo ser observada a tendência dos resultados obtidos.

Ainda baseado sobre a mesma norma é citado os principais tipos de instrumentos mais difundidos no mercado:

- Pino de referência;
- Marco de referência;
- Medidor de convergência;
- Fios de prumo;
- Inclinômetro;
- Tassômetro;
- Piezômetro que pode ser:
 - ✓ Tubo aberto ou *standpipe*;
 - ✓ Pneumático;
 - ✓ Hidráulico;
 - ✓ Elétrico;
 - ✓ Corda vibrante e;
 - ✓ Multinível.

Por fim, ainda que nas obras sejam empregados equipamentos e instrumentos modernos e de qualidade, existe um fator preponderante na efetivação do controle tecnológico, o profissional. No caso do operador, necessita ser constantemente atualizado e qualificado para que a precisão e exatidão de suas medições estejam dentro das exigências normatizadas, reduzindo os erros acidentais e principalmente os erros grosseiros.

4.6 Drenagem Ácida de Mina

Dentre os vários riscos que a mineração apresenta à saúde pública pela intervenção ao meio ambiente, existe a possibilidade do impacto sobre os sistemas e recursos naturais devido à formação da drenagem ácida da mina. É gerada pela oxidação da pirita e a formação de ácido sulfúrico, sulfato e íons ferroso e férrico, catalisados principalmente pelas espécies *Thiobacillus ferrooxidans* e *Thiobacillus denitrificans* segundo (Rubio, 1998), que é exposta ao ar e à água.

Segundo a U.S.EPA (1994), o potencial para uma mina produzir ácido e liberar contaminantes depende basicamente de três fatores:

- Disponibilidade da água, oxigênio, íons férricos e bactérias para catalisar as reações de oxidação;
- Neutralização do ácido produzido;
- Hidrologia local, geologia e tipo de tecnologia minerária empregada.

Shinobe & Sracek (1997) descrevem que em pilha de estéril a principal característica do material é a heterogeneidade do tamanho das partículas, variando desde frações argilosas até blocos de vários metros, a qual resulta em alta permeabilidade da pilha formada. Conseqüentemente, a previsão de produção de drenagem ácida e de qualidade da água drenada nesses locais constituem tarefas bastante laboriosas.

Este fenômeno segundo Robertson & Kirsten (1989) não é restrito necessariamente a atividades de mineração, mas pode ocorrer sempre que rocha com sulfeto é exposta ao ar e água. Algumas fontes naturais são ácidas geralmente na proximidade de afloramentos destas rochas. A reação de oxidação é frequentemente acelerada pela atividade biológica e química com rendimento de baixo pH da água que tem o potencial para mobilizar qualquer metal pesado que possam se encontrar contido no desperdício de rocha ou em outro local. Se a água está disponível como um meio de transporte, a drenagem resultante pode conter produtos do processo de geração de acidez com nível elevado de metal e sulfato. Logo, esta drenagem pode causar um impacto negativo sobre a qualidade da água no meio natural receptor.

O resíduo do processo de extração da mina, de abertura de acessos e de instalações adjacentes é gerado pelas operações de escavação para construção das estruturas

necessárias para a exploração do minério, em particular nas operações a céu aberto. Estes resíduos estão expostos à precipitação, escoamento superficial e possivelmente de infiltração. A pilha de estéril que contem sulfetos é grande fonte de drenagem ácida. A quantidade de material de rocha das atividades de mineração subterrânea é proporcionalmente menor do que as minas a céu aberto. Assim o potencial de carga de drenagem ácida em água superficial tem aumentado significativamente com as operações de mineração mais recente a céu aberto. As propriedades químicas e físicas do despejo de resíduo de rocha irá afetar a qualidade de drenagem ácida e a mudança das características leva tempo (Errington and Ferguson, 1987).

Para Robertson & Kirsten (1989) o armazenamento de minério de baixo teor é muitas vezes preocupação especial para as agências reguladoras, desde a queda dos preços dos metais pode consequentemente produzir minério de baixo pH para se destinar à pilha de estéril, onde é muitas vezes fonte de geração de drenagem ácida. Dentre as operações de lixiviação, pode incluir lixiviação de cianeto para a recuperação de ouro, ácido de lixiviação de processos de recuperação de metal base e bio lixiviação que também são geralmente de baixo pH. Estas operações geralmente resultam em drenagem ácida de pilha de minério após o processo de fechamento da mina, particularmente aos associados com pH baixo. Embora as operações de lixiviação de cianeto seja realizadas com pH elevado, o potencial de neutralização do material lixiviado residual pode esgotar com o tempo, resultando em um líquido ácido gerador de potencial poluidor ambiental.

Segundo Rodrigues (2001) são exemplos de impactos ambientais vinculados à drenagem ácida: a contaminação de aquíferos, disponibilização e biodisponibilização de metais e a contaminação de lagos e reservatórios. A contaminação de aquíferos por efluentes ácidos ocorre devido à percolação no solo desses efluentes até o lençol freático. Como visto anteriormente, os efluentes ácidos podem conter altas concentrações de metais pesados e sólidos em suspensão dissolvidos, prejudicando a qualidade dos aquíferos quando contaminados por tais efluentes. Porém existem alguns aquíferos que possuem tampões de ação rápida em suas matrizes que podem neutralizar a drenagem ácida em quase sua totalidade. O processo de oxidação dos minerais sulfetados ocasiona, por conseguinte, o rebaixamento dos valores de pH do meio. Nessas condições, metais como o ferro, cobre, zinco, cádmio, manganês e outros, presentes nas rochas e/ou minerais, são solubilizados. Valores de concentração destes metais bem acima dos normalmente aceitos pela legislação são comuns neste tipo de ambiente. A drenagem ácida quando alcança lagos e reservatórios provoca sérias alterações nestes sistemas lânticos. Assim, o controle no uso e o

monitoramento da quantidade, qualidade da água e dos usos e ocupações da área adjacente ao corpo d'água, particularmente em áreas de mineração, são fundamentais para a restauração e manutenção da qualidade ambiental.

Apesar dos processos controladores da produção e migração de ácido em pilhas de estéril e bacias de rejeitos serem química e biologicamente similares, apresentam grandes diferenças em relação às condições físicas como pode ser observado na tabela 4.1.

Produção de Ácido	Pilha de Estéril
Fonte de enxofre	Variável em concentração e local. Condições podem variar desde bolsões ricos em enxofre até material alcalino dentro de pequenos espaços.
Variação de pH	Condições altamente variáveis em pequenos intervalos.
Iniciação de uma rápida oxidação	Usualmente começa imediatamente após os primeiros estéreis serem empilhados (disparadores do processo).
Entrada de oxigênio	Penetra livremente ao longo de canais preferenciais com fluxos altamente condutivos bem como através de grandes espaços vazios na base da pilha.
Temperatura	Temperatura na pilha produzida pelo fluxo convectivo de fora para dentro da pilha. Altas taxas de oxidação são obtidas resultando em altas temperaturas distribuídas convectivamente através da pilha.
Infiltração	Infiltração rápida ao longo dos canais preferenciais.
Liberação das drenagens ácidas	Ocorre rapidamente através de infiltrações na extensão da pilha.

Tabela 4.1- Características da drenagem ácida em pilhas de estéril.
Fonte: Modificado de Souza (2001)

4.7 Estruturas auxiliares

O objetivo deste capítulo é apresentar as principais estruturas do sistema de drenagem superficial, interno e dique de sedimento que servem de apoio ao perfeito funcionamento e manutenção de todas as estruturas da mineração, como acesso, usina, barragem de rejeito, pit da mina, canteiro de obra, alojamento e pilha de rejeito que é o foco desta pesquisa.

- **Drenagem Superficial**

A drenagem superficial tem como objetivo interceptar e captar, conduzindo ao deságue seguro, as águas provenientes de suas áreas adjacentes e aquelas que se precipitam sobre a pilha de estéril, resguardando sua segurança e estabilidade.

Para um sistema de drenagem superficial eficiente, utiliza-se uma série de dispositivos com objetivos específicos, a saber:

- Canal de proteção de corte:

O canal de proteção de corte tem como objetivo interceptar as águas que escoam pelo terreno natural a montante impedindo-as de atingir o talude de corte. Serão construídas em todos os trechos em corte onde o escoamento superficial proveniente dos terrenos adjacentes possa atingir o talude, comprometendo a estabilidade do corpo da pilha. Deverão ser localizadas proximamente paralelas as cristas dos cortes, a uma distância entre 2,0 a 3,0 metros. O material resultante da escavação deve ser colocado entre a valeta e a crista do corte e apilado manualmente, como na figura 3.5.

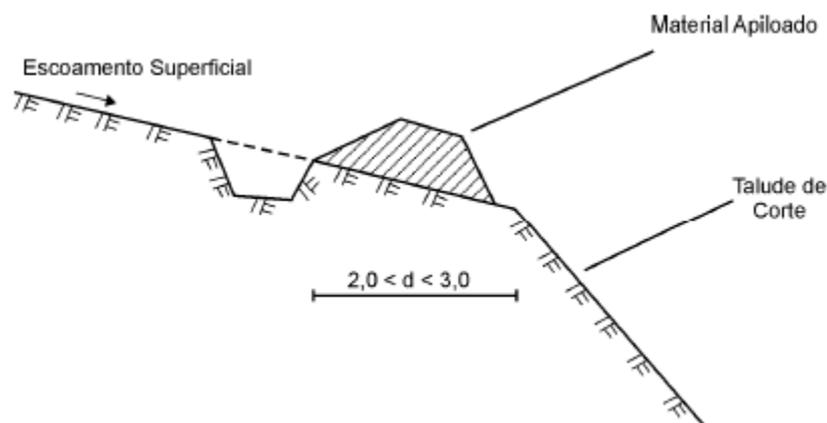


Figura 3.5 – Canal Proteção de Corte
Fonte: Manual de drenagem - DNIT (2006)

- Canal de proteção de aterro:

O canal de proteção de aterro tem como objetivo interceptar as águas que escoam pelo terreno a montante, impedindo-as de atingir o pé do talude de aterro. Além disso, têm a finalidade de receber as águas das sarjetas e valetas de corte, conduzindo-as com segurança, ao dispositivo de transposição de talvegues. Deverão localizar aproximadamente paralela ao pé do talude de aterro a uma distância entre 2,0 e 3,0 metros. O material resultante da escavação deve ser colocado entre a valeta e o pé do talude de aterro, apilado manualmente

com o objetivo de suavizar a interseção das superfícies do talude e do terreno natural, como na figura 3.6.

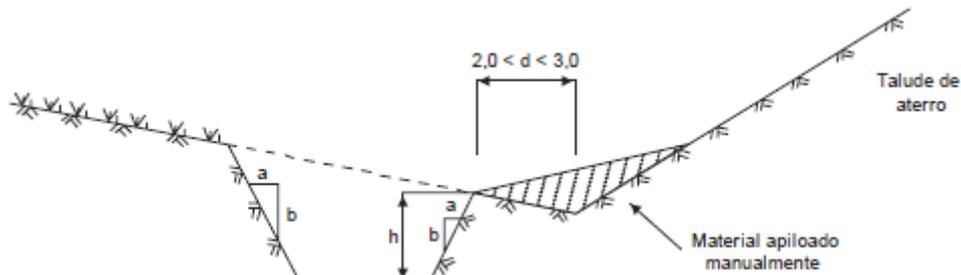


Figura 3.6 – Canal Proteção de Aterro
Fonte: Manual de drenagem - DNIT (2006)

- Descida d'água:

A descida d'água tem como objetivo conduzir as águas captadas por outros dispositivos de drenagem, pelo talude de corte e aterro, conforme apresentado na figura 3.7. Tratando-se de cortes, as descidas d'água têm como objetivo principal conduzir as águas dos canais quando atingem seu comprimento crítico, ou de pequenos talwegues, desaguando numa caixa coletora ou na sarjeta de corte. No aterro as descidas d'água conduzem as águas provenientes dos canais de aterro quando é atingido seu comprimento crítico e nos pontos baixos, através das saídas d'água, desaguando no terreno natural. As descidas d'água também atendem, no caso de cortes e aterros, às valetas de bermas quando é atingido seu comprimento crítico e em pontos baixos. Não raramente, devido à necessidade de saída de bueiros elevados desaguando no talude do aterro, as descidas d'água são necessárias visando conduzir o fluxo pelo talude até o terreno natural. Posicionam-se sobre os taludes dos cortes e aterros seguindo as suas declividades e também na interseção do talude de aterro com o terreno natural nos pontos de passagem de corte e aterro.

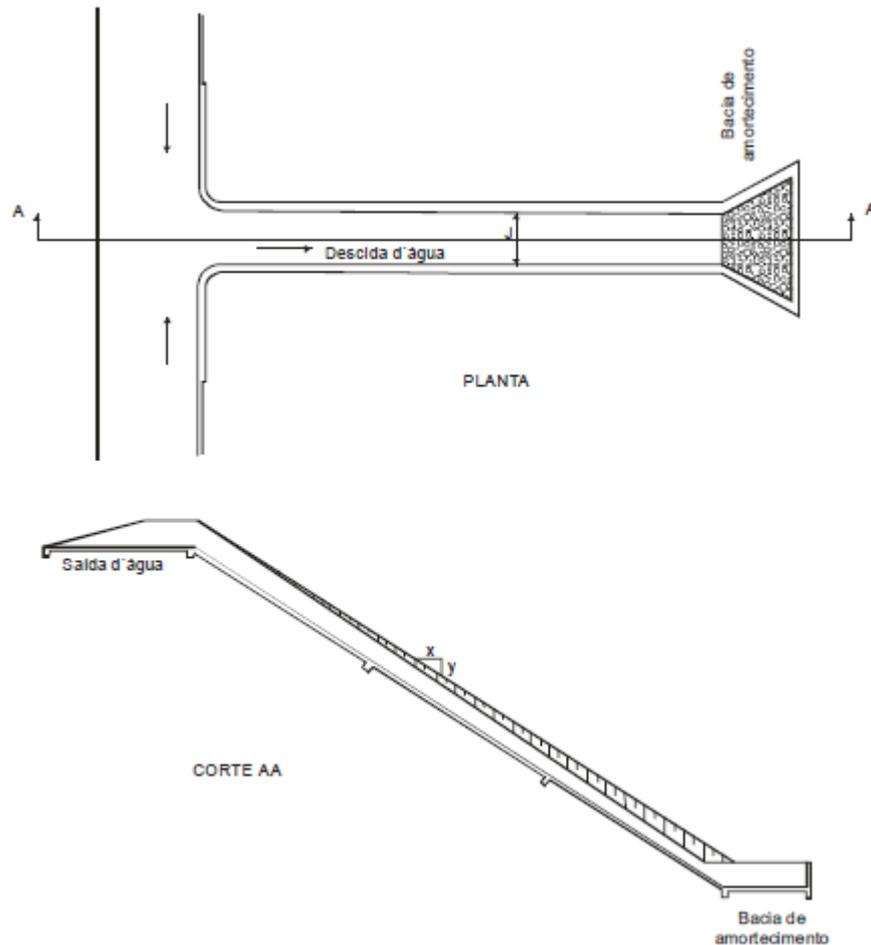


Figura 3.7 – Descida d'água
 Fonte: Manual de drenagem - DNIT (2006)

- Dissipador de Energia:

O dissipador de energia, como o nome indica, é dispositivos destinados a dissipar energia do fluxo d'água, reduzindo conseqüentemente sua velocidade quer no escoamento através do dispositivo de drenagem quer no deságue para o terreno natural, de modo a evitar o fenômeno da erosão, como na figura 3.8. As bacias de amortecimento serão instaladas de um modo geral nos seguintes locais:

- ✓ No pé das descidas d'água nos aterros;
- ✓ Na boca de jusante dos bueiros;
- ✓ Na saída das sarjetas de corte, nos pontos de passagem de corte e aterro.

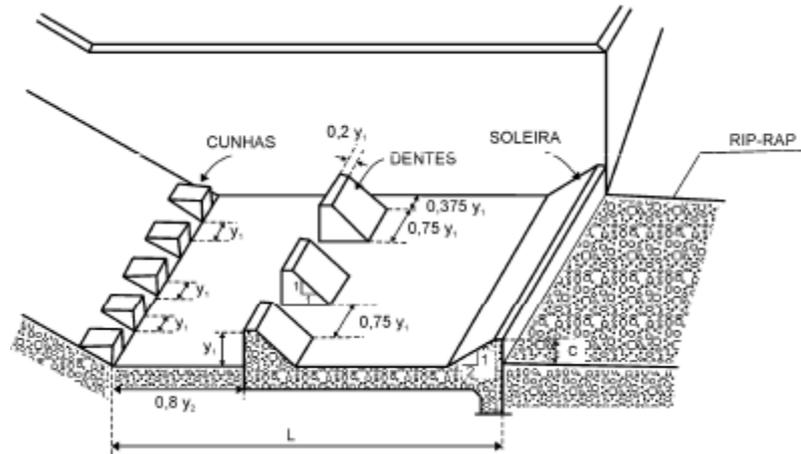


Figura 3.8 – Dissipador de Energia
Fonte: Manual de drenagem - DNIT (2006)

- Escalonamento de Taludes:

O escalonamento de talude tem como objetivo evitar que as águas precipitadas sobre a plataforma e sobre os taludes, atinjam, através do escoamento superficial, uma velocidade acima dos limites de erosão dos materiais que os compõe. As banquetas ou bermas neste caso são providas de dispositivos de captação das águas, sarjetas de banquetas, que conduzirão as águas ao deságue seguro, como na figura 3.9.

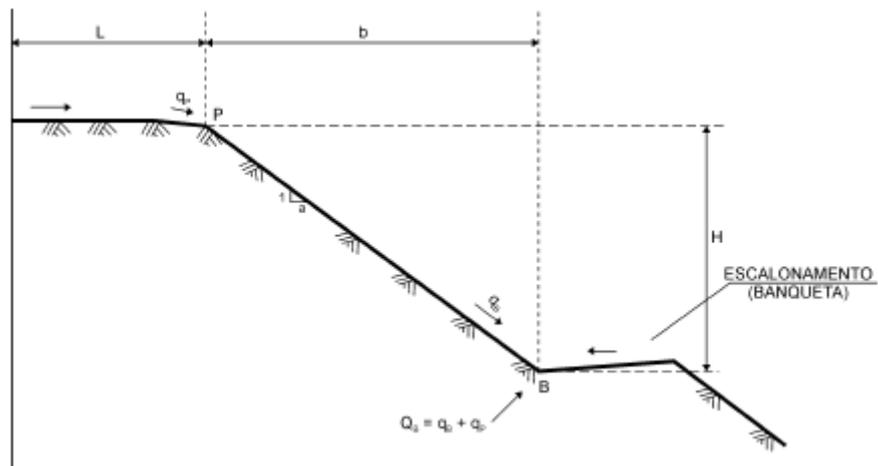


Figura 3.9 – Escalonamento de Taludes
Fonte: Manual de drenagem - DNIT (2006)

- Corta-rios:

Os corta-rios são canais de desvio abertos com a finalidade de evitar que um curso d'água existente interfira com a diretriz da rodovia, obrigando a construção de sucessivas obras de transposição de talvegues, afastar as águas que ao serpentear em torno da diretriz da estrada, coloquem em risco a estabilidade dos aterros e melhorar a diretriz, como na figura 3.10.

O projeto de corta-rios deverá constar levantamento topográfico da área, projeto horizontal, constando de plantas amarradas ao projeto da rodovia e em escala conveniente, projeto vertical, constando do perfil longitudinal a mesma referência altimétrica do projeto da rodovia, seções transversais típicas com indicação dos taludes laterais de acordo com a natureza do solo e detalhando, quando for o caso, o revestimento adotado e memória de cálculo. No projeto do corta-rios deverá sempre haver um comparativo econômico entre a construção deste e a construção das obras necessárias para substituí-lo.

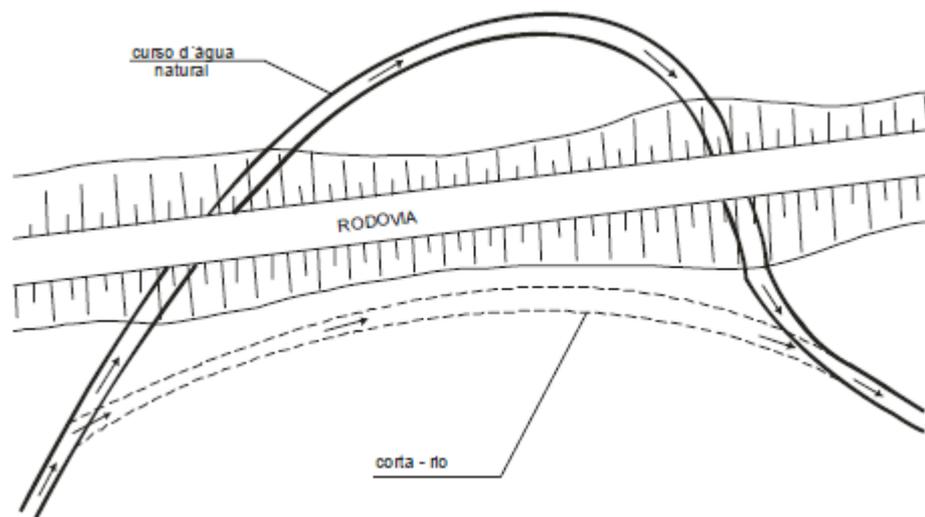


Figura 3.10 – Corta-Rios

Fonte: Manual de drenagem - DNIT (2006)

- Canal extravasor:

Canal extravasor é uma estrutura hidráulica que pode ser utilizada para diferentes finalidades, como medição de vazão e controle de vazão, sendo estes os principais usos. Em barragens, o excesso de água deve ser descarregado para jusante de forma segura. Isto pode ser feito de diferentes formas, sendo a principal delas com o uso de extravasor. Assim, possui um canal que possibilita o escoamento da água até a bacia de dissipação onde se forma um ressalto hidráulico, se ela existir.

O excesso de água acumulada em um reservatório de uma barragem seja de uma usina hidrelétrica ou de outra barragem de qualquer tipo, como para irrigação, abastecimento, navegação etc., deve ser extravasado de forma segura por um canal ou túnel, de montante para a jusante. Neste sentido, o extravasor é o órgão de segurança da represa. Ele também é chamado de vertedouro, sangrador ou sangradouro, como na figura 3.11.

Os extravasores podem conter algum mecanismo de comporta que regule a passagem do fluxo de água por ele. Nas barragens este serviço geralmente é feito por comportas de aço, ou por válvulas.

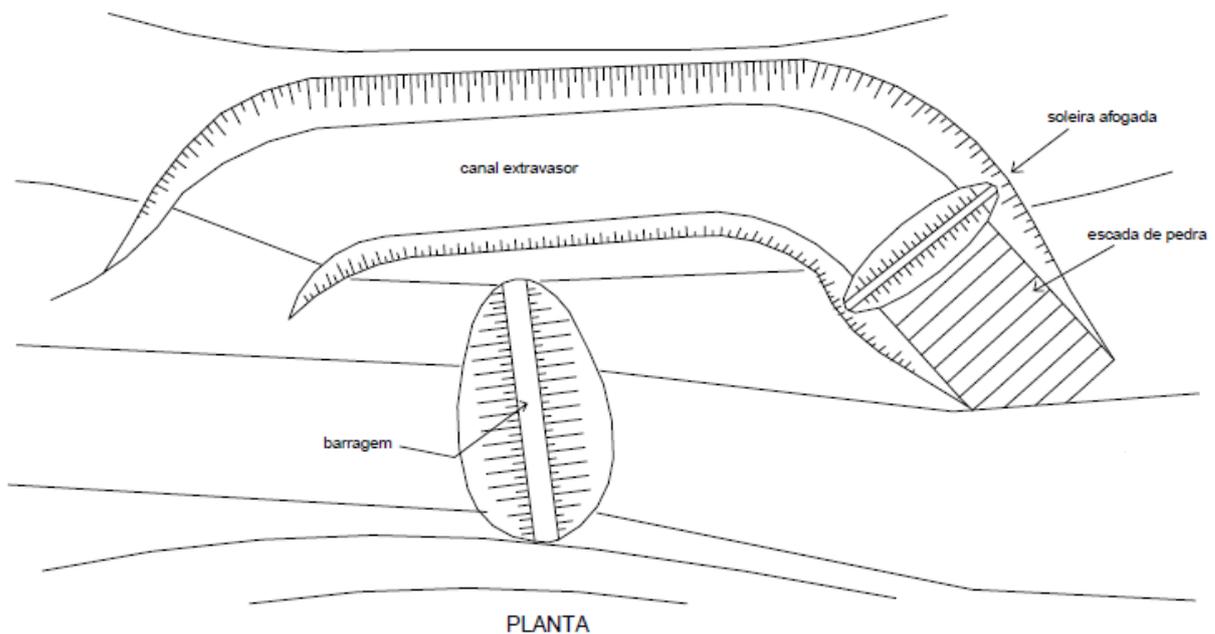


Figura 3.11 – Canal Extravasor
Fonte: Eletrobrás (2000)

- Drenagem Interna

A drenagem interna tem como objetivo interceptar e captar, conduzindo ao deságue seguro, as águas provenientes de suas áreas adjacentes e aquelas que se precipitam dentro da pilha de estéril, resguardando sua segurança e estabilidade.

A água na natureza, provinda das chuvas que se formam na atmosfera, no que interessa a drenagem das estruturas, tem dois destinos diferentes: parte escorre sobre a superfície dos solos e parte se infiltra, podendo formar lençóis subterrâneos. É claro que estas situações não são únicas e distintas, havendo variação das condições em função das graduações que tornam os solos mais ou menos permeáveis, mais ou menos impermeáveis,

criando condições próprias para cada região, no que se refere a solos, topografia e clima. Há ainda um terceiro aspecto pelo qual a água se apresenta sob a forma de "franja capilar", resultante da ascensão capilar, a partir dos lençóis d'água, obedecendo as leis da capilaridade. A influência produzida pela "franja capilar" deve ser eliminada, ou reduzida, pelos rebaixamentos dos referidos lençóis freáticos.

- Dreno Profundo:

Os drenos profundos têm por objetivo principal interceptar o fluxo da água subterrânea através do rebaixamento do lençol freático, impedindo-o de atingir o subleito. Os drenos profundos são instalados, preferencialmente, em profundidades da ordem de 1,50 a 2,00m, tendo por finalidade captar e aliviar o lençol freático e, conseqüentemente, proteger o corpo da pilha de estéril. Devem ser instalados nos trechos em corte, nos terrenos planos que apresentem lençol freático próximo do subleito, bem como nas áreas eventualmente saturadas próximas ao pé dos taludes e nos locais onde haja necessidade de interceptar e rebaixar o lençol freático, como na figura 3.12.

Os materiais empregados nos drenos profundos diferenciam-se de acordo com as suas funções, a saber:

- ✓ materiais filtrantes: areia, agregados britados e geotextil;
- ✓ materiais drenantes: britas e cascalho grosso lavado;
- ✓ materiais condutores: tubos de concreto (poroso ou perfurado), tubos cerâmicos (perfurados), fibro-cimento, materiais plásticos (corrugado, flexível perfurado, ranhurado) e metálicos.

Há casos em que não são colocados tubos no interior dos drenos, nestes casos eles são chamados de "drenos cegos" (dreno francês).

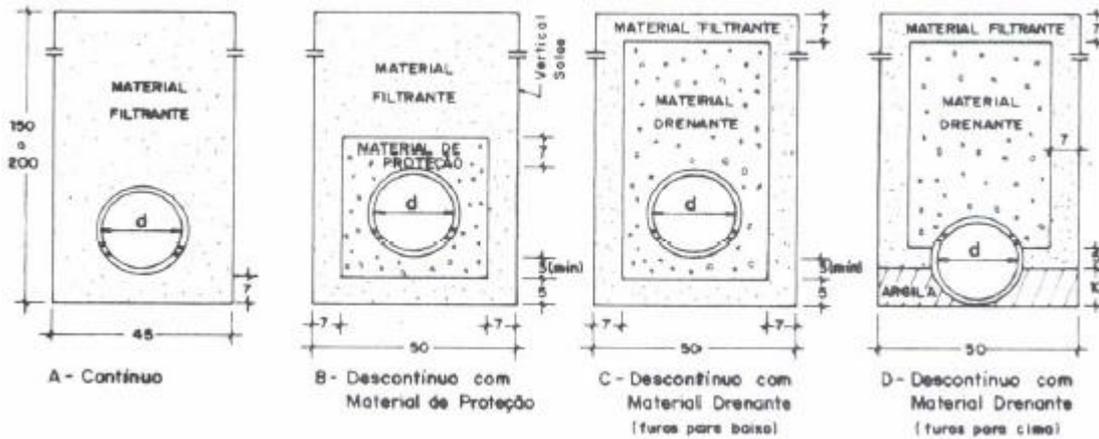


Figura 3.12 – Corta-Rios
Fonte: Manual de drenagem - DNIT (2006)

- Drenos em Espinha de Peixe:

São drenos destinados à drenagem de grandes áreas, normalmente usados em série, em sentido oblíquo em relação ao eixo longitudinal da estrutura, ou das área à drenar. Geralmente são de pequena profundidade e, por este motivo, sem tubos, embora possam eventualmente ser usados com tubos. Podem ser exigidos em cortes, quando os drenos longitudinais forem insuficientes para a drenagem da área. Podem ser projetados em terrenos que receberão aterros e nos quais o lençol freático estiver próximo da superfície. Como também ser necessários nos aterros quando o solo natural for impermeável. Conforme as condições existentes podem desaguar livremente ou em drenos longitudinais, conforme se vê na figura 3.13.

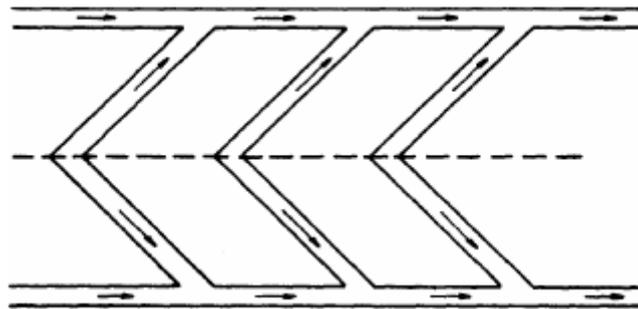


Figura 3.13 – Dreno de Espinha de Peixe
Fonte: Manual de drenagem - DNIT (2006)

- Colchão Drenante:

O objetivo das camadas drenantes é drenar as águas, situada a pequena profundidade do corpo da pilha de estéril, em que o volume não possa ser drenado pelo dreno "espinha de peixe". São usadas:

- a) nos cortes em rocha;
- b) nos cortes em que o lençol freático estiver próximo do greide da terraplenagem;
- c) na base dos aterros onde houver água livre próximo ao terreno natural;
- d) nos aterros constituídos sobre terrenos impermeáveis.

A remoção das águas coletadas pelos colchões drenantes, deverá ser feita por drenos longitudinais.

- **Dreno Sub-Horizontal:**

Os drenos sub-horizontais são aplicados para a prevenção e correção de escorregamentos nos quais a causa determinante da instabilidade é a elevação do lençol freático ou do nível piezométrico de lençóis confinados. No caso de escorregamentos de grandes proporções, geralmente trata-se da única solução econômica a se recorrer.

São constituídos por tubos providos de ranhuras ou orifícios na sua parte superior, introduzidos em perfurações executadas na parede do talude, com inclinação próxima à horizontal. As figuras 3.14 e 3.15 mostram um dreno típico. Estes tubos drenam a água do lençol ou lençóis, aliviando a pressão nos poros. Considerando-se que mais importante que o alívio da pressão é a mudança da direção do fluxo d'água, orientando assim a percolação para uma direção que contribua para o aumento da estabilidade.

Em solos ou rochas permeáveis ou muito fraturadas a vazão pode ser grande, enquanto que em solos menos permeáveis a vazão pode ser pequena ou nula, embora o alívio de pressão esteja presente, neste caso as vazões podem ser tão pequenas que a água recolhida evapora ao longo de seu caminho no interior do tubo, como efeito positivo.

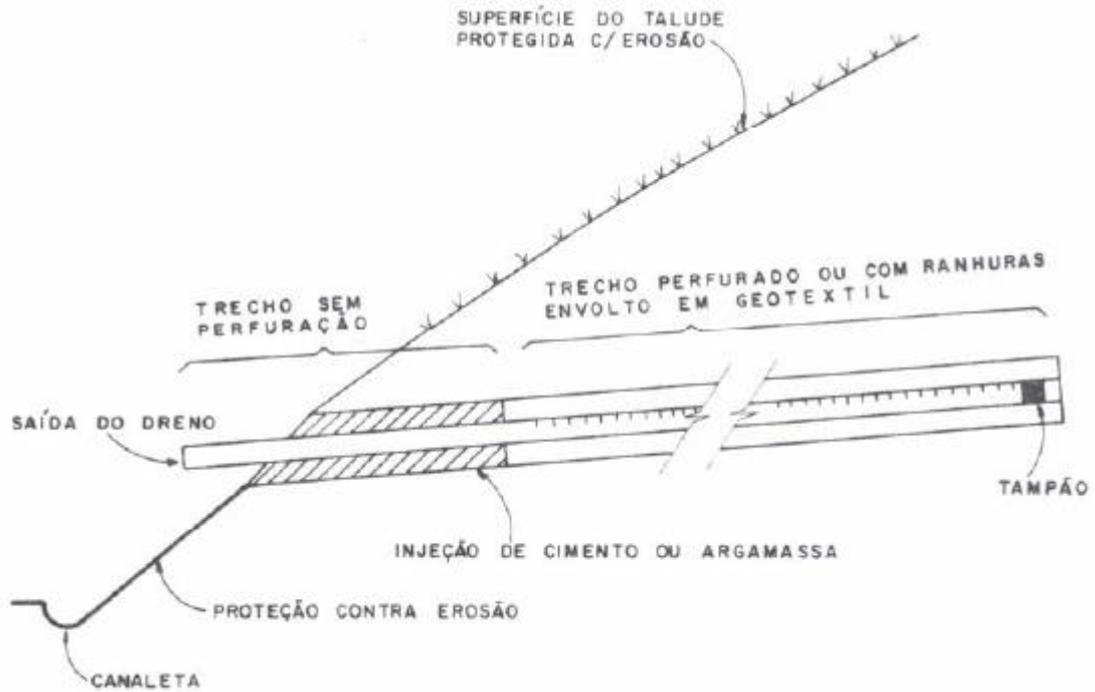


Figura 3.14 – Dreno Sub-Horizontal
 Fonte: Manual de drenagem - DNIT (2006)

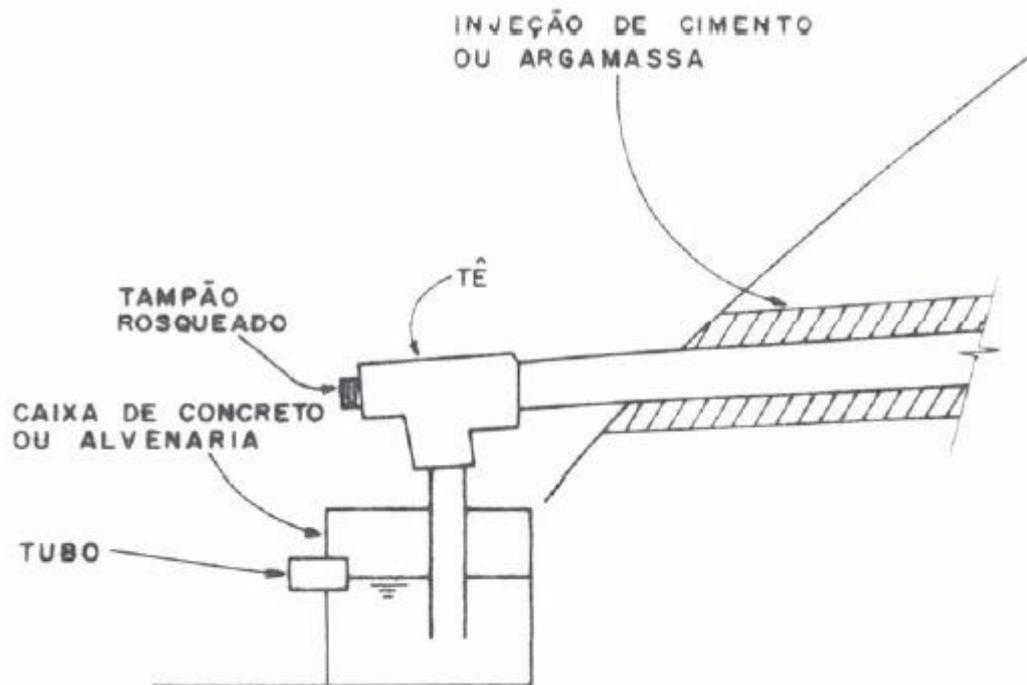


Figura 3.15 – Dreno Sub-Horizontal - Detalhe
 Fonte: Manual de drenagem - DNIT (2006)

- Geotêxtil:

Os geotêxteis são materiais têxteis permeáveis com aplicação em obras ou estruturas geotécnicas. Como tantos outros materiais aplicados em obras de engenharia, os geotêxteis possuem características ou propriedades que definem seu comportamento quando instalados em uma estrutura pertencente à obra. Para se definir as características dos geotêxteis, esses materiais são submetidos a alguns ensaios que simulem situações reais e que forneçam resultados que possam ser usados em um dimensionamento ou pelo menos que possam servir de subsídios para a seleção do produto mais adequado para a situação encontrada. Esta situação de obra pode estar ligada ao desempenho do geotêxtil ou às suas condições de instalação, que muitas vezes definem também o desempenho.

As funções do geotêxtil são filtração, separação, reforço, proteção e drenagem transversal. A função de filtração está relacionada ao tipo de solo. Quando instalado entre um solo e um meio drenante, o geotêxtil permite a livre passagem da água ao mesmo tempo em que retém as partículas do solo necessárias para sua estabilização. Deve-se observar que são características importantes para função de permeabilidade, porosidade e abertura de filtração que é capacidade de retenção de partículas. Na função da separação entre dois materiais de granulometrias diferentes, o geotêxtil impede que estes se misturem mantendo cada qual sua característica, ao mesmo tempo em que permite a livre passagem da água nos dois sentidos evitando sub-pressões. Aqui também são características importantes como abertura de filtração (porosimetria), resistência ao funcionamento, resistência ao estouro, resistência à propagação do rasgo, resistência à tração (localizada). Na função do reforço, o geotêxtil atua como reforço sempre que solicitado à tração no sentido de aumentar a resistência do material que o envolve. São características importantes como resistência à tração, alongamento, rigidez (curva tração X alongamento), o atrito com o solo, a fluência e isotropia. Na função de proteção o geotêxtil absorve os esforços e tensões localizadas que incide diretamente sobre o material protegido que poderiam danificá-lo. São características importantes como espessura, resistência ao funcionamento e resistência ao estouro. A função da drenagem transversal é desempenhada pelo geotêxtil quando transporta gases ou líquidos através de sua espessura no plano da manta. Aqui é importante caracterizar a espessura e permeabilidade transversal.

- **Dique de Contenção de Sedimento**

O dique de contenção de sedimento é uma estrutura similar a uma barragem de terra com proporções dimensionais menores, com a finalidade de reter as partículas finas da pilha de estéril escoada pela água pluvial para evitar a contaminação da drenagem ácida do meio ambiente, para minimizar os danos ambientais.

Lembrando que na pilha de estéril a principal característica do material é a heterogeneidade do tamanho das partículas, variando desde frações argilosas até blocos de vários metros, a qual resulta em alta permeabilidade da pilha formada. Conseqüentemente, a previsão de produção de drenagem ácida e de qualidade da água drenada nesses locais constituem tarefas bastante laboriosas.

Por definição barragem, neste caso como dique, pode ser definida como sendo um elemento estrutural, construída transversalmente à direção de escoamento de um curso d'água, destinada a criação de um reservatório artificial de acumulação de água, podendo ser construída de terra ou enrocamento. A barragem de terra são as mais elementares obras de barragens e normalmente se prestam para qualquer tipo de fundação, desde a rocha compacta, até terrenos construídos de materiais não consolidados. Esses últimos são seu campo típico de aplicação. Existe certa variabilidade no tipo de barragem de terra, que poderá ser homogêneo ou zonado. A barragem de enrocamento é aquela em que são utilizados blocos de rocha de tamanho variável e uma membrana impermeável na face de montante. O custo para a produção de grandes quantidades de rocha, para a construção desse tipo de barragem, somente é econômico em áreas onde o custo do concreto fosse elevado ou onde ocorresse escassez de materiais terrosos e houvesse, ainda, excesso de rocha dura e resistente. No trecho mais a montante da barragem é necessário utilizar material granular impermeável para impedir o carreamento dos finos oriundos da pilha de estéril, pois caso contrário, poderá descaracterizar e perder a finalidade de retenção do material mais fino gerador da drenagem ácida.

Para alcançar desempenho esperado do dique de contenção de sedimento é imprescindível que esteja locado de forma a captar todos os “braços” da bacia hidrográfica que o empreendimento de mineração se encontra. A bacia hidrográfica, ou de captação, ou de drenagem, é uma área delimitada espacialmente pelo relevo através dos divisores de água linha de pontos elevados, sendo drenada por um curso d'água ou um sistema conectado de cursos d'água ou rede de drenagem, tal que, a vazão efluente seja descarregada através de uma simples saída chamada de seção de controle. A denominação bacia de captação associa-se

com a sua função de captar as águas pluviais que caem dentro de seus limites. Já, a denominação como bacia de drenagem está associada à sua função de promover a drenagem superficial e subterrânea das águas contidas dentro de seus limites, como mostra a figura 3.16.

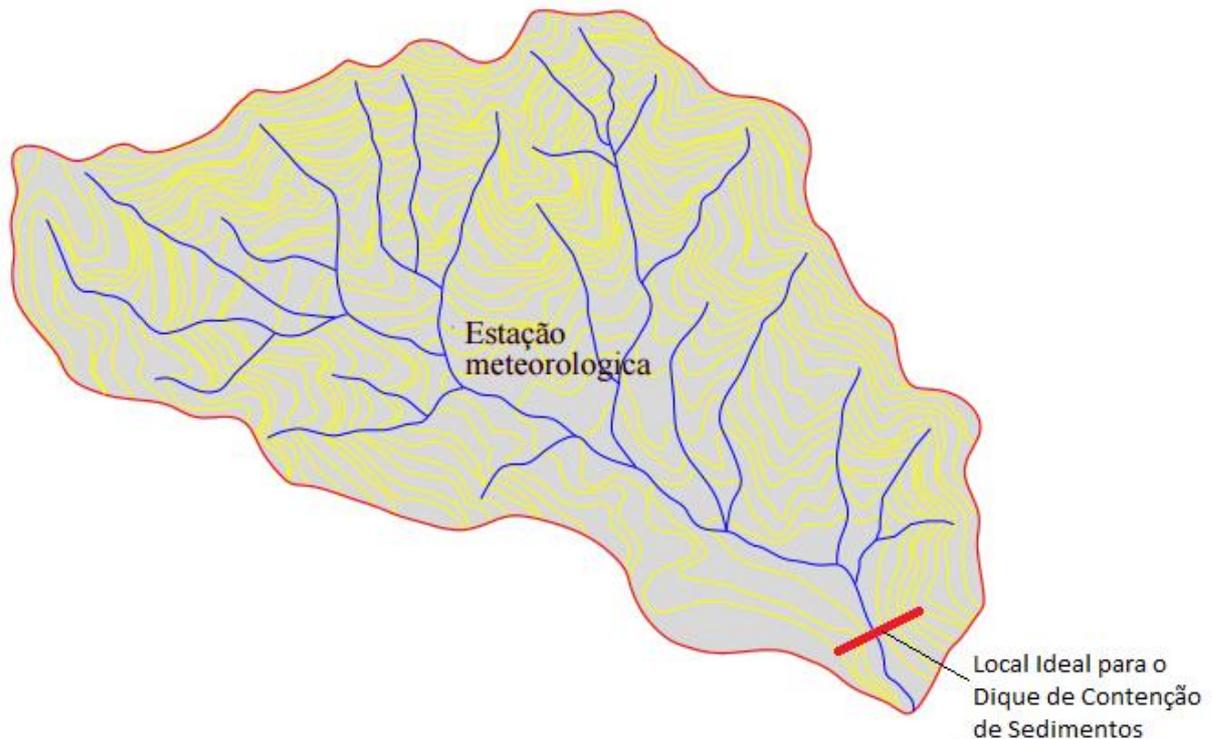


Figura 3.16 – Bacia de Captação
Fonte: Autor (2016)

Pode também acontecer o caso de necessitar construir uma bacia para represamento de materiais finos como também de água pluvial, para diversas finalidades, em local topograficamente desfavorável como exemplo de região alta ou plana. De acordo com o projeto hidráulico é escavado canal perimetral trapezoidal ou não para escoar da pilha de estéril até a bacia que pode ser circular ou retangular, de forma a atender as exigências de projeto e da disposição do terreno, também com a finalidade de evitar a drenagem ácida e problemas consequentes.

Apesar do dique de contenção de sedimento normalmente ser uma estrutura de dimensões pequenas, há a necessidade de prever também a execução do canal extravasor para em caso de ocorrer cheia causada por tempo de retorno além do estimado, gerando o rompimento do mesmo, com contaminação da drenagem ácida, prejuízo material e humano.

5 Estudo de Caso

Este estudo de caso apresenta as principais etapas do dimensionamento como análise de estabilidade dos taludes com modelo geológico geotécnico, fator de segurança mínimo, capacidade de armazenagem, características geométricas e parâmetros geotécnicos para promover a construção com a segurança exigida pelo porte de tal empreendimento.

5.1 Dimensionamento

A área do empreendimento localiza-se na porção sudeste do Estado do Pará, no município de Curionópolis. As principais cidades da região são Belém, capital do Estado do Pará, e Marabá, na figura 5.1.



Figura 5.1 – Mapa do Pará

Fonte: Autor (2016)

Os critérios do dimensionamento constituem a base para obtenção de um projeto econômico e seguro. A seguir serão apresentados os critérios adotados neste capítulo, definidos em consonância com diretrizes de elaboração de projetos de pilhas de disposição de estéril e com os requisitos das normas técnicas vigentes no Brasil e na bibliografia geotécnica internacional, com particular ênfase ao atendimento das recomendações da NBR 13029.

Assim, ressalta-se que o estudo de caso da pilha de disposição de estéril foi conduzido seguindo as mais recentes normas técnicas e códigos em vigor no Brasil, com a observação de procedimentos técnicos e recomendações presentes na bibliografia técnica, compatível com o estado da arte geotécnico praticado no Brasil e no exterior.

O estabelecimento dos critérios geométricos e geotécnicos visa permitir a programação adequada das investigações, com o objetivo da obtenção dos parâmetros de resistência para as análises geotécnicas, fixação dos elementos de drenagem, conforme a seguir:

A estrutura da pilha de disposição de estéril visa permitir o armazenamento de um volume de aproximadamente 17,6 milhões de metros cúbicos, o qual será disposto na área correspondente à estrutura, em aproximadamente 83 meses de operação da cava a céu aberto, ver tabela 5.1;

A altura de cada bancada da pilha de estéril será de 10 metros, sendo que a largura das bermas entre bancadas será de 7 metros. Os taludes da pilha de estéril possuem inclinação de 2,5H:1V ($\sim 22^\circ$). A cota máxima que atingirá a estrutura da pilha de estéril será de 260 m, permitindo o armazenamento do volume de aproximadamente 21,5 milhões de metros cúbicos de material, ver tabela 5.1.

O sistema de drenagem será composto pela drenagem interna, perimetral e superficial, como mostra a figura 5.2. Os materiais que compõem estes sistemas de drenagem deverão apresentar características adequadas, permitindo o correto funcionamento da estrutura.

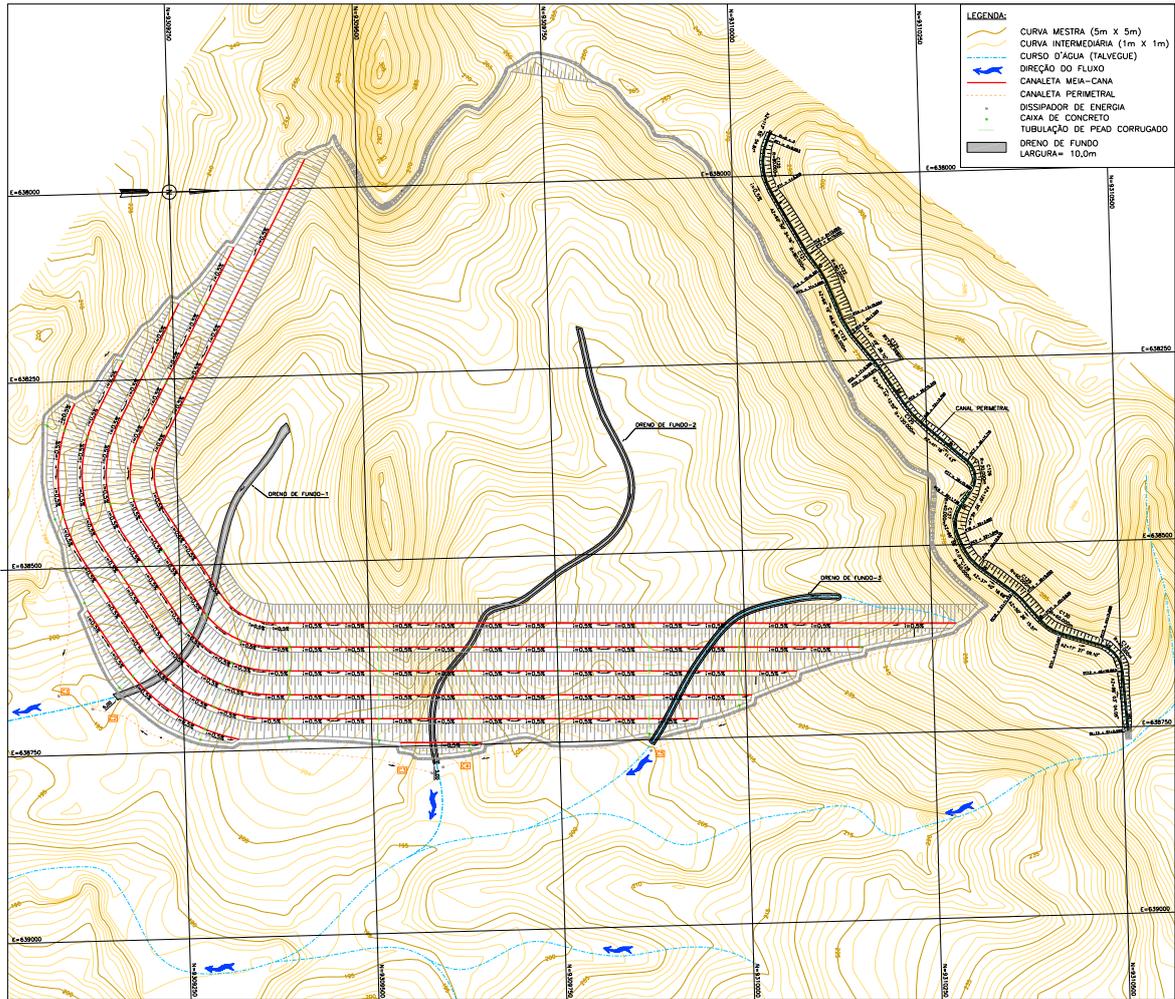


Figura 5.2 – Pilha de Estéril e Sistema de Drenagem
 Fonte: Autor (2016)

Tabela 5.1 – Volumes totais da Pilha de Estéril.

Período	VOLUME DE ESTÉRIL				VOLUMES DE SOLO E SAPROLITO				VOLUMES TOTAIS		
	Massa [t]	Volume estéril <i>in situ</i> ¹ [m ³]	Volume estéril <i>empolado</i> ² [m ³]	Acumulado	Volume solo <i>in situ</i> [m ³]	Volume saprolito <i>in situ</i> [m ³]	Volume solo <i>empolado</i> ³ [m ³]	Volume saprolito <i>empolado</i> ³ [m ³]	Por mês	Acumulados	
Ano 1	Mês 1	522.181.97	193.400.73	290.101.09	290.101.09	186.952.00	666.067.00	21.811.07	77.707.82	389.619.98	389.619.98
	Mês 2	113.108.55	41.892.05	62.838.08	352.939.18			21.811.07	77.707.82	162.356.96	551.976.94
	Mês 3	492.132.18	182.271.18	273.406.77	626.345.94			21.811.07	77.707.82	372.925.65	924.902.59
	Mês 4	412.350.72	152.722.49	229.083.73	855.429.68			21.811.07	77.707.82	328.602.62	1.253.505.21
	Mês 5	512.561.46	189.837.58	284.756.37	1.140.186.04			21.811.07	77.707.82	384.275.25	1.637.780.46
	Mês 6	403.830.19	149.566.74	224.350.10	1.364.536.15			21.811.07	77.707.82	323.868.99	1.961.649.45
	Mês 7	169.482.80	62.771.41	94.157.11	1.458.693.26			21.811.07	77.707.82	193.675.99	2.155.325.44
	Mês 8	449.192.43	166.367.57	249.551.35	1.708.244.61			21.811.07	77.707.82	349.070.23	2.504.395.67
	Mês 9	454.610.32	168.374.19	252.561.29	1.960.805.89			21.811.07	77.707.82	352.080.17	2.856.475.84
	Mês 10	213.095.16	78.924.13	118.386.20	2.079.192.09			21.811.07	77.707.82	217.905.08	3.074.380.93
	Mês 11	397.873.33	147.360.49	221.040.74	2.300.232.83			21.811.07	77.707.82	320.559.62	3.394.940.55
	Mês 12	455.829.87	168.825.88	253.238.82	2.553.471.65			21.811.07	77.707.82	352.757.70	3.747.698.25
Ano 2	Mês 13	455.886.53	168.846.86	253.270.29	2.806.741.94	121.227.00	309.776.00	14.143.15	36.140.53	303.553.98	4.051.252.22
	Mês 14	453.390.80	167.922.52	251.883.78	3.058.625.71			14.143.15	36.140.53	302.167.46	4.353.419.68
	Mês 15	316.239.42	117.125.71	175.688.57	3.234.314.28			14.143.15	36.140.53	225.972.25	4.579.391.93
	Mês 16	486.388.73	180.143.97	270.215.96	3.504.530.24			14.143.15	36.140.53	320.499.64	4.899.891.58
	Mês 17	369.864.26	136.986.76	205.480.15	3.710.010.39			14.143.15	36.140.53	255.763.83	5.155.655.41
	Mês 18	494.298.21	183.073.41	274.610.12	3.984.620.51			14.143.15	36.140.53	324.893.80	5.480.549.21
	Mês 19	490.252.75	181.575.09	272.362.64	4.256.983.14			14.143.15	36.140.53	322.646.32	5.803.195.53
	Mês 20	461.573.34	170.953.09	256.429.63	4.513.412.78			14.143.15	36.140.53	306.713.31	6.109.908.84
	Mês 21	515.449.02	190.907.04	286.360.56	4.799.773.34			14.143.15	36.140.53	336.644.25	6.446.553.09
	Mês 22	462.459.46	171.281.28	256.921.92	5.056.695.26			14.143.15	36.140.53	307.205.60	6.753.758.69
	Mês 23	481.258.03	178.243.72	267.365.57	5.324.060.83			14.143.15	36.140.53	317.649.26	7.071.407.95
	Mês 24	490.375.21	181.620.45	272.430.67	5.596.491.51			14.143.15	36.140.53	322.714.36	7.394.122.31
Ano 3	Mês 25	292.276.17	108.250.43	162.375.65	5.758.867.16	46.330.00	218.843.00	5.405.17	25.531.68	193.312.50	7.587.434.81
	Mês 26	431.565.07	159.838.91	239.758.37	5.998.625.53			5.405.17	25.531.68	270.695.22	7.858.130.03

	Mês 27	497.439.49	184.236.85	276.355.27	6.274.980.80			5.405.17	25.531.68	307.292.12	8.165.422.15
	Mês 28	478.865.35	177.357.54	266.036.31	6.541.017.11			5.405.17	25.531.68	296.973.16	8.462.395.31
	Mês 29	498.191.72	184.515.45	276.773.18	6.817.790.28			5.405.17	25.531.68	307.710.03	8.770.105.33
	Mês 30	474.889.24	175.884.90	263.827.36	7.081.617.64			5.405.17	25.531.68	294.764.21	9.064.869.54
	Mês 31	191.332.99	70.864.07	106.296.11	7.187.913.74			5.405.17	25.531.68	137.232.96	9.202.102.49
	Mês 32	455.941.27	168.867.14	253.300.71	7.441.214.45			5.405.17	25.531.68	284.237.56	9.486.340.05
	Mês 33	479.124.96	177.453.69	266.180.54	7.707.394.99			5.405.17	25.531.68	297.117.39	9.783.457.44
	Mês 34	234.151.23	86.722.68	130.084.02	7.837.479.00			5.405.17	25.531.68	161.020.87	9.944.478.30
	Mês 35	432.256.76	160.095.10	240.142.64	8.077.621.65			5.405.17	25.531.68	271.079.49	10.215.557.80
	Mês 36	471.754.58	174.723.92	262.085.88	8.339.707.52			5.405.17	25.531.68	293.022.73	10.508.580.52
Ano 4	Mês 37	226.928.64	84.047.64	126.071.47	8.465.778.99	NÃO HÁ EXTRAÇÃO DE SOLO PARA DISPOSIÇÃO NA PILHA NO ANO 4				126.071.47	10.634.651.99
	Mês 38	440.858.95	163.281.09	244.921.64	8.710.700.63					244.921.64	10.879.573.63
	Mês 39	516.958.63	191.466.16	287.199.24	8.997.899.87					287.199.24	11.166.772.87
	Mês 40	374.073.87	138.545.88	207.818.82	9.205.718.69					207.818.82	11.374.591.69
	Mês 41	522.877.67	193.658.40	290.487.60	9.496.206.28					290.487.60	11.665.079.28
	Mês 42	447.296.08	165.665.21	248.497.82	9.744.704.10					248.497.82	11.913.577.10
	Mês 43	433.281.83	160.474.75	240.712.13	9.985.416.23					240.712.13	12.154.289.23
	Mês 44	313.313.23	116.041.94	174.062.90	10.159.479.14					174.062.90	12.328.352.14
	Mês 45	417.565.32	154.653.82	231.980.73	10.391.459.87					231.980.73	12.560.332.87
	Mês 46	435.863.12	161.430.78	242.146.18	10.633.606.04					242.146.18	12.802.479.04
	Mês 47	429.752.19	159.167.48	238.751.22	10.872.357.26					238.751.22	13.041.230.26
	Mês 48	243.536.03	90.198.53	135.297.79	11.007.655.05					135.297.79	13.176.528.05
Ano 5	Mês 49	415.659.20	153.947.85	230.921.78	11.238.576.83	NÃO HÁ EXTRAÇÃO DE SOLO PARA DISPOSIÇÃO NA PILHA NO ANO 5				230.921.78	13.407.449.83
	Mês 50	354.123.62	131.156.90	196.735.34	11.435.312.18					196.735.34	13.604.185.18
	Mês 51	377.382.89	139.771.44	209.657.16	11.644.969.34					209.657.16	13.813.842.34
	Mês 52	385.969.29	142.951.59	214.427.38	11.859.396.72					214.427.38	14.028.269.72
	Mês 53	364.470.96	134.989.25	202.483.87	12.061.880.59					202.483.87	14.230.753.59
	Mês 54	412.415.57	152.746.51	229.119.76	12.291.000.35					229.119.76	14.459.873.35
	Mês 55	396.861.67	146.985.80	220.478.70	12.511.479.05					220.478.70	14.680.352.05
	Mês 56	404.338.78	149.755.10	224.632.66	12.736.111.71					224.632.66	14.904.984.71
	Mês 57	390.561.32	144.652.34	216.978.51	12.953.090.22					216.978.51	15.121.963.22
	Mês 58	412.122.17	152.637.84	228.956.76	13.182.046.98					228.956.76	15.350.919.98
	Mês 59	389.433.83	144.234.75	216.352.13	13.398.399.11					216.352.13	15.567.272.11
	Mês 60	402.846.83	149.202.53	223.803.79	13.622.202.90					223.803.79	15.791.075.90

Ano 6	Mês 61	181.047.84	67.054.76	100.582.13	13.722.785.03	NÃO HÁ EXTRAÇÃO DE SOLO PARA DISPOSIÇÃO NA PILHA NO ANO 6				100.582.13	15.891.658.03
	Mês 62	115.095.06	42.627.80	63.941.70	13.786.726.73					63.941.70	15.955.599.73
	Mês 63	195.009.30	72.225.67	108.338.50	13.895.065.23					108.338.50	16.063.938.23
	Mês 64	176.128.67	65.232.84	97.849.26	13.992.914.49					97.849.26	16.161.787.49
	Mês 65	188.463.08	69.801.14	104.701.71	14.097.616.20					104.701.71	16.266.489.20
	Mês 66	70.652.55	26.167.61	39.251.42	14.136.867.62					39.251.42	16.305.740.62
	Mês 67	193.059.15	71.503.39	107.255.08	14.244.122.70					107.255.08	16.412.995.70
	Mês 68	174.311.66	64.559.88	96.839.81	14.340.962.51					96.839.81	16.509.835.51
	Mês 69	161.500.03	59.814.83	89.722.24	14.430.684.75					89.722.24	16.599.557.75
	Mês 70	153.592.62	56.886.16	85.329.23	14.516.013.98					85.329.23	16.684.886.98
	Mês 71	167.697.23	62.110.08	93.165.13	14.609.179.11					93.165.13	16.778.052.11
	Mês 72	160.774.04	59.545.94	89.318.91	14.698.498.02					89.318.91	16.867.371.02
Ano 7	Mês 73	163.049.10	60.388.55	90.582.83	14.789.080.85	NÃO HÁ EXTRAÇÃO DE SOLO PARA DISPOSIÇÃO NA PILHA NO ANO 7				90.582.83	16.957.953.85
	Mês 74	103.682.31	38.400.86	57.601.29	14.846.682.14					57.601.29	17.015.555.14
	Mês 75	158.110.49	58.559.44	87.839.16	14.934.521.30					87.839.16	17.103.394.30
	Mês 76	132.731.80	49.159.92	73.739.89	15.008.261.18					73.739.89	17.177.134.18
	Mês 77	86.660.32	32.096.41	48.144.62	15.056.405.81					48.144.62	17.225.278.81
	Mês 78	149.294.98	55.294.44	82.941.66	15.139.347.46					82.941.66	17.308.220.46
	Mês 79	133.371.20	49.396.74	74.095.11	15.213.442.57					74.095.11	17.382.315.57
	Mês 80	93.299.00	34.555.18	51.832.78	15.265.275.35					51.832.78	17.434.148.35
	Mês 81	97.849.55	36.240.57	54.360.86	15.319.636.21					54.360.86	17.488.509.21
	Mês 82	39.277.39	14.547.18	21.820.77	15.341.456.99					21.820.77	17.510.329.99
	Mês 83	30.209.04	11.188.53	16.782.80	15.358.239.79					16.782.80	17.527.112.79
TOTAL	27.644.831.62	10.238.826.53	15.358.239.79	-	354.509.00	1.194.686.00	496.312.60	1.672.560.40	17.527.112.79	-	

Notas:

¹ Densidade do estéril 2,7 m³/t

² Fator de empolamento estéril de 1,5

³ Fator de empolamento do solo e sapolito 1,4

A estabilidade dos taludes da pilha de estéril teve o valor calculado baseado nos fatores de segurança mínimo indicado na Tabela 5.2. orientado pelo manual de engenharia da USACE, no qual estabelece método de análise de estabilidade que satisfaça todas as condições de equilíbrio.

Tabela 5.2 – Fatores de segurança mínimos admissíveis

CONDIÇÃO DAS ANÁLISES	FATOR DE SEGURANÇA ADMISSÍVEL
Pseudo-estática	$\geq 1,0$
Curto prazo	$\geq 1,3$
Longo prazo	$\geq 1,5$

O Dique de Contenção de Sedimentos tem o objetivo de reter o material sólido arrastado de parte da pilha de disposição de estéril. O arraste de material sólido se dá quando há escoamento superficial por sobre a pilha em decorrência de chuvas intensas. O referido dique formará um lago cujo volume total será de aproximadamente $70,7 \times 10^3$ metros cúbicos, com uma lâmina d'água de 191 metros de elevação. Além disso, apresenta taludes de 2H:1V ($\sim 27^\circ$) tanto a montante quanto a jusante, conformado por três tipos de materiais: aterro compactado, material de transição e estéril.

O critério para avaliar a estabilidade do talude do dique se encontra na Tabela 5.3. orientado pelo manual de engenharia da USACE, no qual estabelece método de análise de estabilidade que satisfaça todas as condições de equilíbrio.

Tabela 5.3 – Fatores de segurança mínimos admissíveis para o dique.

CONDIÇÃO DE ANÁLISE	FATOR DE SEGURANÇA ADMISSÍVEL
Pseudo-estática	$\geq 1,0$
Curto prazo	$\geq 1,3$
Longo prazo	$\geq 1,5$

A figura 5.3 apresenta a curva de elevação das bancadas da pilha de estéril comparada com o volume do armazenamento. Este gráfico auxilia no planejamento da execução da pilha de estéril baseado na produção e desenvolvimento do empreendimento mineral, para atender a demanda e garantir que todo o processo da cadeia produtiva da mina se torne eficaz e eficiente.

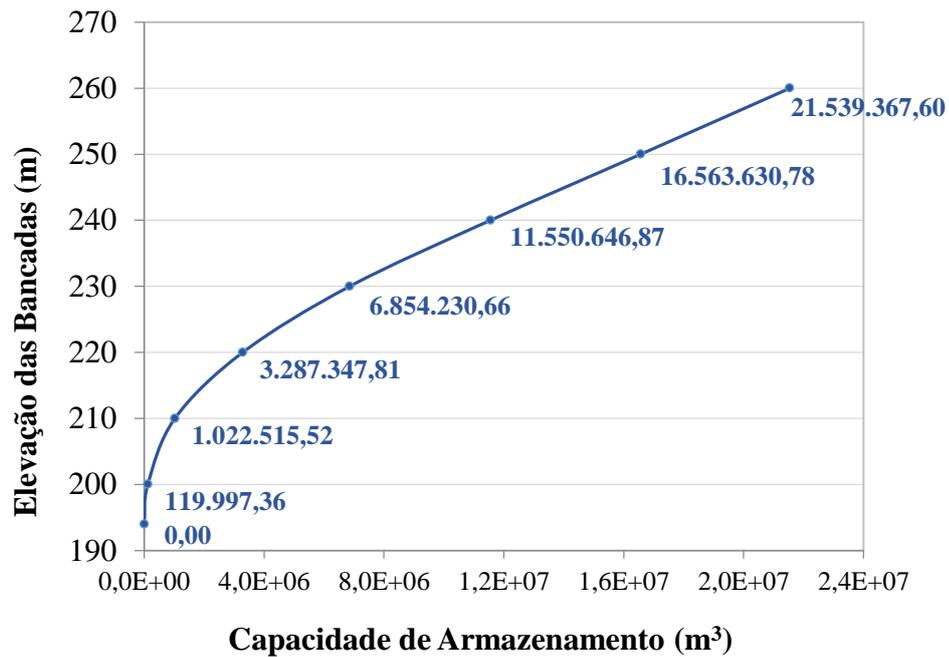


Figura 5.3 – Curva Elevação das Bancadas vs. Volume do Armazenamento
Fonte: Autor (2016)

Na tabela 5.4 é apresentada uma síntese das características geométricas da pilha projetada.

Tabela 5.4 – Características geométricas da estrutura.

CARACTERÍSTICAS	UNIDADE	QUANTIDADE
Altura da bancada entre bermas	m	10
Largura das bermas	m	7
Inclinação do talude entre bermas		2,5H:1V (~22°)
Inclinação média do talude		3,1H:1V (~22°)
Cota máxima	m	260
Capacidade volumétrica	m³	21.539.367
Área total ocupada pela estrutura	m²	752.544,49

Na Figura 5.4, está representada a planta com a configuração geométrica final da pilha de estéril na área considerada.

Para avaliar a estabilidade física da estrutura, foram seleccionadas duas secções transversais A-A e B-B, que constam na figura 5.5 e 5.6, representativas das regiões mais críticas da pilha apresentada na figura 5.4.

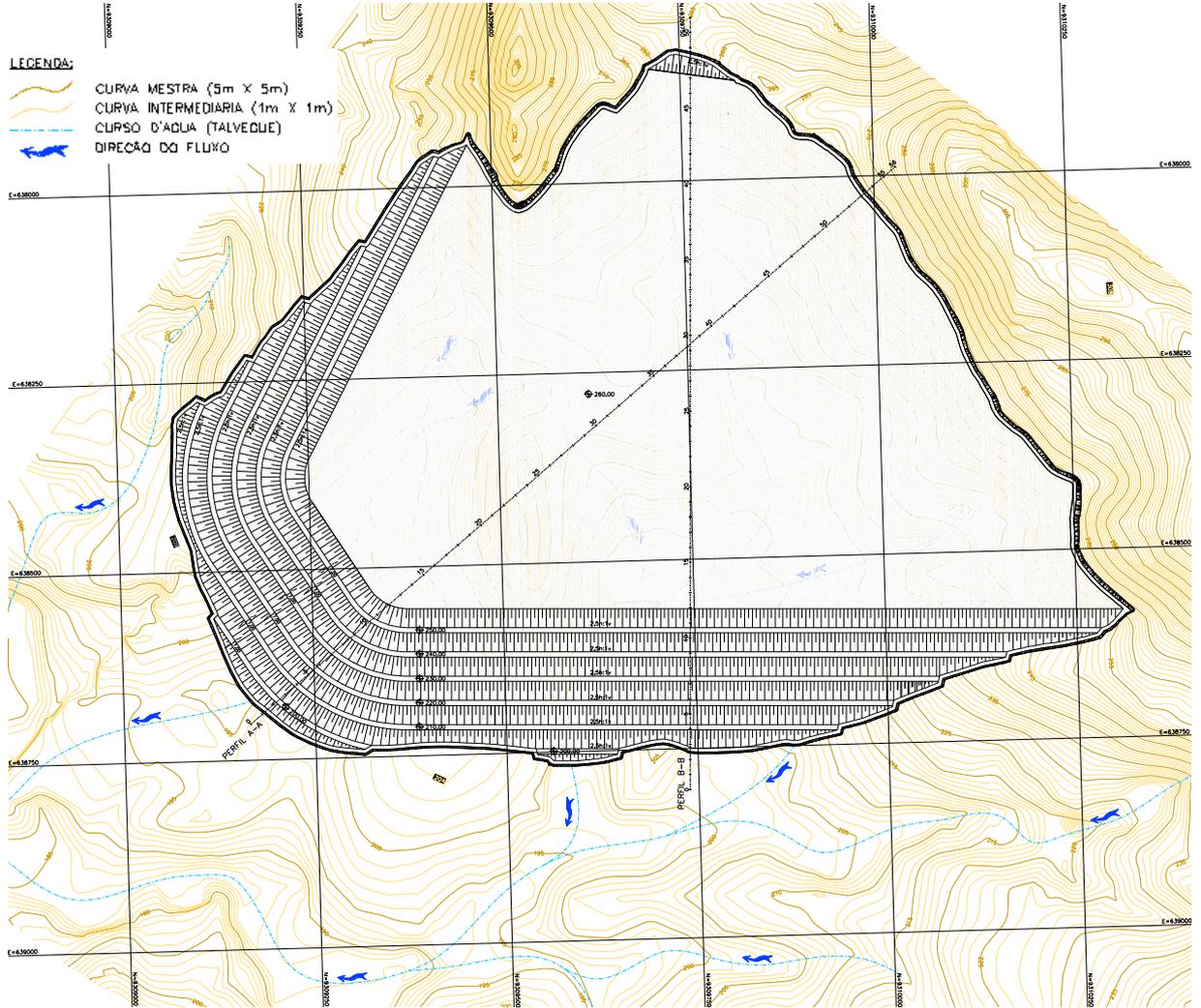


Figura 5.4 – Planta da Disposição do Estévil
 Fonte: Autor (2016)

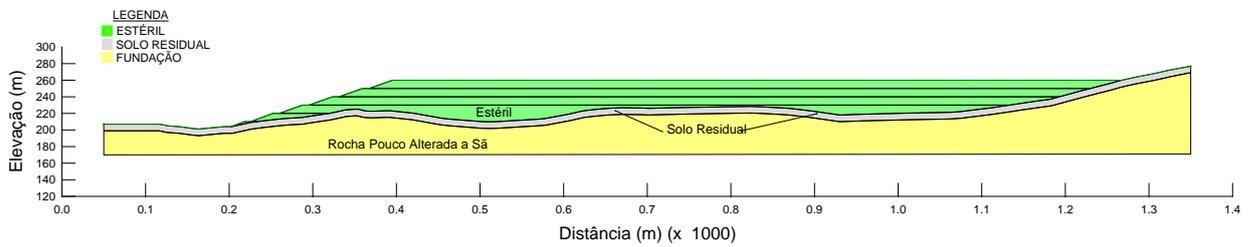


Figura 5.5 – Modelo geológico-geotécnico do maciço da pilha – secção crítica A-A
 Fonte: Autor (2016)

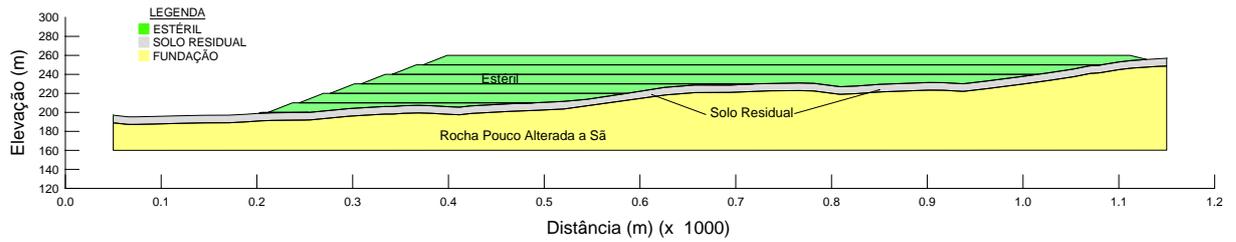


Figura 5.6 – Modelo geológico-geotécnico do maciço da pilha – seção crítica B-B
Fonte: Autor (2016)

Para o dique de contenção de sedimento foi avaliado a seção transversal principal, levando em consideração a escavação da fundação de aproximadamente 1 metro, assim como, as inclinações de 2H:1V ($\sim 27^\circ$) nos taludes de montante e jusante, e finalmente a altura máxima de 7 metros.

A escolha da seção utilizada na análise de estabilidade física foi realizada com base na região mais crítica do dique, sendo apresentada na figura a seguir:

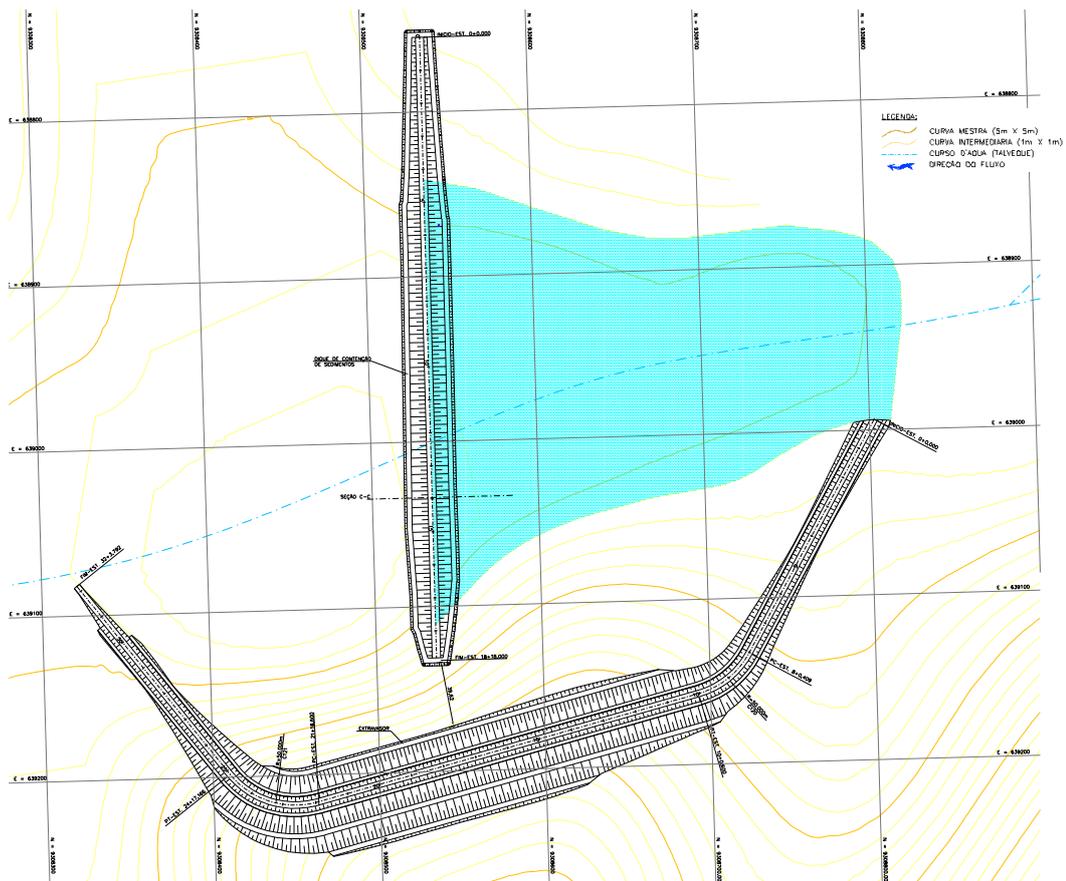


Figura 5.7 – Planta da Dique de Contenção de Sedimentação
Fonte: Autor (2016)

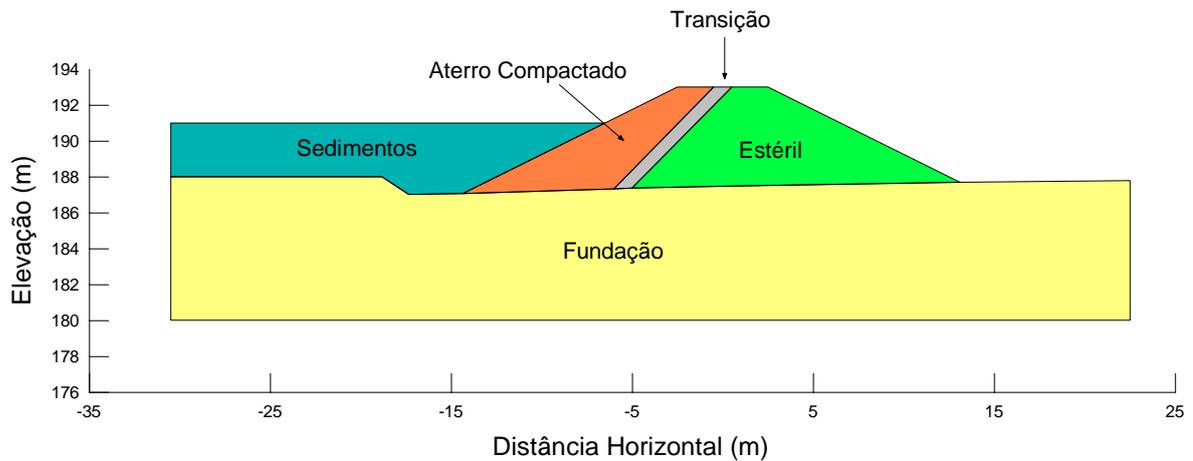


Figura 5.8 – Modelo geológico-geotécnico do maciço do dique – seção crítica C-C
Fonte: Autor (2016)

Os parâmetros geotécnicos para determinar a resistência ao cisalhamento (c = coesão; ϕ = ângulo de atrito) e caracterização (γ = peso específico) dos materiais constituintes dos modelos geológico-geotécnicos da pilha e do dique de contenção de sedimentos foram adotados a partir de dados laboratoriais e bibliografia técnica. Na Tabela 5.5, são apresentados os parâmetros geotécnicos utilizados nas análises de estabilidade.

Tabela 5.5 – Parâmetros geotécnicos utilizados nas análises.

MATERIAL	COESÃO (kPa)	ÂNGULO DE ATRITO (°)	PESO ESPECÍFICO (kN/m ³)
Aterro compactado	10	30	18
Transição de areia	0	33	18
Sedimentos	$S_u = 0,15\sigma'_{vo}$		12
Estéril	0	30	23
Solo residual	15	30	19
Rocha pouco alterada a sã	50	35	21

Após definidos os modelos geológico-geotécnicos, o cálculo de estabilidade foi realizado através do módulo SLOPE/W, correspondente ao programa computacional GeoStudio versão 7.10, desenvolvido pela Geo-Slope Internacional Ltda. O módulo SLOPE/W, permite analisar a estabilidade dos taludes pela teoria do equilíbrio limite. O método escolhido para o cálculo do fator de segurança nas análises de estabilidade foi o de Morgenstern-Price.

Para análise de estabilidade da pilha de disposição de estéril os valores do fator de segurança calculados (FS ATUAL) e requeridos (FS REQ), determinados das análises de estabilidade realizadas nas seções A-A e B-B, são mostrados na Tabela , de acordo com os critérios de segurança exigidos pelas normativas brasileiras.

Tabela 5.6 – Resultado das análises de estabilidade da pilha.

SEÇÃO	CONDIÇÃO DE ANÁLISE	FS ATUAL	FS REQ
A – A	Etapa final (Longo prazo)	2,05	1,5
B – B	Etapa final (Longo prazo)	1,86	1,5

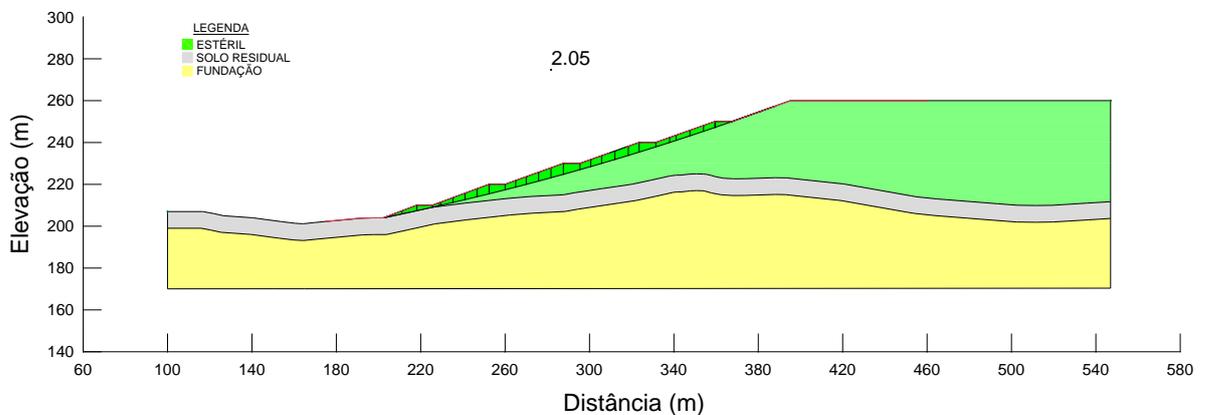


Figura 5.9 – Análise de estabilidade estática na condição de Etapa Final – Seção A-A
Fonte: Autor (2016)

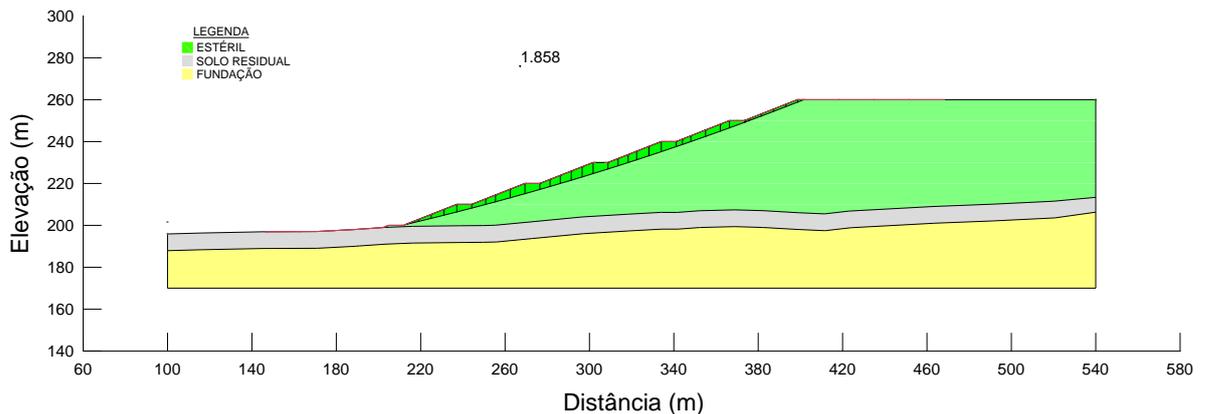


Figura 5.10 – Análise de estabilidade estática na condição de Etapa Final – Seção B-B
Fonte: Autor (2016)

Para análise de estabilidade do dique de contenção de sedimento os valores do fator de segurança calculados (FS ATUAL) e requeridos (FS REQ), determinados das análises de estabilidade realizadas na seção C-C, são mostrados na Tabela 5.7, de acordo com os critérios de segurança exigidos pelas normativas brasileiras.

Tabela 5.7 – Resultado das análises de estabilidade do dique.

SEÇÃO	CONDIÇÃO DE ANALISE	FS ATUAL	FS REQ
C – C	Etapa final (Longo prazo)	1,51	1,5

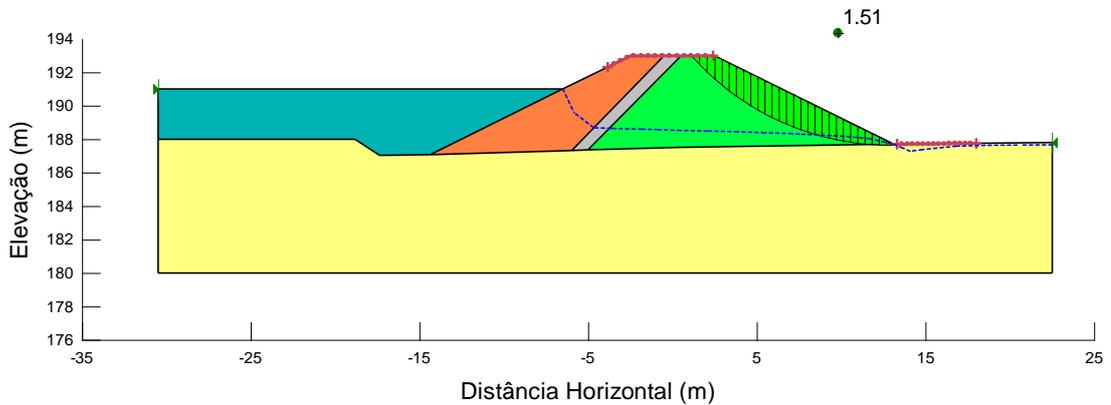


Figura 5.11 – Análise de estabilidade estática na condição de Etapa Final – Seção C-C
Fonte: Autor (2016)

As análises das seções transversais da pilha apresentada acima mostram que as condições geométricas estabelecidas no estudo de caso atendem a todos os critérios requeridos para garantir a estabilidade física da pilha de estéril. Portanto, pode-se concluir que o estudo apresenta condições de estabilidade que satisfazem aos critérios de segurança estabelecidos pela ABNT NBR 13029 (2006) em vigor, bem como a prática geotécnica internacional referenciada na USACE.

5.2 Classificação

Neste capítulo, utilizando-se as informações do estudo de caso descrito anteriormente, procurou-se avaliar a estabilidade da pilha de estéril, tomando-se como base o modelo de classificação adotado pelo governo canadense intitulado “*Mined Rock and Overburden Piles*” (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991).

Tal modelo de classificação pode ser utilizado em todas as fases da vida de uma pilha de estéril, desde o seu planejamento até o fechamento. Além disso, propicia realizar classificações preliminares dos possíveis locais para disposição do estéril, tornando possíveis comparações entre diferentes locais quanto ao potencial de instabilidade. Serve ainda para estabelecer os parâmetros de monitoramento necessários para cada local de acordo com cada classe encontrada.

O modelo de classificação consta de duas partes principais, a saber: avaliação de estabilidade (tabela 5.7) e classificação de pilha (tabela 5.8).

Tabela 5.7 - Tabela de pontuação de Estabilidade de Pilhas de Estéril (modificado BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991)

Fatores-Chave que afetam a Estabilidade		Faixa de Condições ou Descrições		Pontuação	Pontuação da Pilha de Estéril
Configuração da Pilha	Altura da Pilha	< 50 m		0	50
		50m – 100m		50	
		100m – 200m		100	
		> 200 m		200	
	Volume da Pilha	Pequeno	< 1 x 10 ⁶ m ³ /banco	0	50
		Médio	1 -50 x 10 ⁶ m ³ /banco	50	
		Grande	> 50 x 10 ⁶ m ³ /banco	100	
	Inclinação	Suave	< 26°	0	50
		Moderada	26° – 35°	50	
		Íngreme	> 35°	100	

Fatores-Chave que afetam a Estabilidade		Faixa de Condições ou Descrições	Pontuação	Pontuação da Pilha de Estéril
Inclinação de Fundação	Suave	10°	0	50
	Moderada	10° - 25°	50	
	Íngreme	25° - 32°	100	
	Extrema	> 32°	200	
Grau de Confinamento	Confinado	<ul style="list-style-type: none"> - Talude côncavo em planta ou seção; - Aterros em vale ou transversais a um vale, pé de talude em contato com a parede oposta do vale; - Ravinas em forma de dente de serra que podem ser usadas para limitar a inclinação de fundação. 	0	50
	Moderadamente Confinado	<ul style="list-style-type: none"> - Bancos ou terraços naturais nos taludes; - Taludes com inclinação uniforme, limitados por topografia natural diversificada; - Empilhamento de estêreis em encostas, em vales abertos, ou transversais a vales. 	50	
	Sem Confinamento	<ul style="list-style-type: none"> - Talude convexo em planta ou seção; - Aterros de encosta ou aterros de crista sem confinamento na base; - Sem ravinas ou bancos para auxiliar a construção. 	100	

Fatores-Chave que afetam a Estabilidade		Faixa de Condições ou Descrições	Pontuação	Pontuação da Pilha de Estéril
Tipo de Fundação	Competente	<ul style="list-style-type: none"> - Materiais de fundação tão ou mais resistentes que os da pilha; - Não sujeita a efeitos adversos da poropressão; - Sem estruturas geológicas desfavoráveis. 	0	100
	Intermediária	<ul style="list-style-type: none"> - Intermediária entre competente e fraca; - Ganho de resistência do solo com adensamento; - Dissipação do excesso de poropressões com o controle da taxa de carregamento. 	100	
	Fraca	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidade de suporte limitada, solos moles; - Sujeita a excesso de poropressão devido ao carregamento; - Condições adversas de água subterrânea, surgências ou infiltrações; - Baixa resistência ao cisalhamento, com alto potencial de liquefação. 	200	
Qualidade do material da pilha	Alta	<ul style="list-style-type: none"> - Resistente, durável; - Menos que 10% de finos. 	0	100
	Moderada	<ul style="list-style-type: none"> - Moderadamente resistente, durabilidade variável; - 10 a 25% de finos. 	100	
	Pobre	<ul style="list-style-type: none"> - Predominância de rochas fracas de baixa durabilidade; - Mais que 25% de finos, material de cobertura (capeamento). 	200	

Fatores-Chave que afetam a Estabilidade		Faixa de Condições ou Descrições	Pontuação	Pontuação da Pilha de Estéril
Método de Construção	Favorável	- Bancos ou camadas não muito espessos (< 25 m de espessura), plataformas largas; - Disposição ao longo das curvas de nível; - Construção ascendente; - “Wrap-arounds” ou terraços.	0	0
	Misto	- Bancos ou bancadas moderadamente espessas (25 m – 50 m); - Métodos mistos de construção.	100	
	Desfavorável	- Bancos ou camadas muito espessas (> 50 m), plataforma estreita (aterro na forma de pontões); - Disposição abaixo da linha de queda do talude; - Construção descendente.	200	
Condições Piezométricas e climáticas	Favorável	- Baixas pressões piezométricas, nenhuma surgência na fundação; - Improvável desenvolvimento de superfície freática no interior da pilha; - Precipitação limitada; - Infiltração mínima na pilha.	0	100
	Intermediária	- Pressões piezométricas moderadas, algumas infiltrações na fundação; - Desenvolvimento limitado da superfície freática na pilha; - Precipitação moderada; - Alta infiltração no interior da pilha.	100	
	Desfavorável	- Altas pressões piezométricas, surgências na fundação; - Alta precipitação; - Moderada precipitação; - Significativo potencial de desenvolvimento de superfície freática ou lençol suspenso no interior da pilha.	200	

Fatores-Chave que afetam a Estabilidade		Faixa de Condições ou Descrições	Pontuação	Pontuação da Pilha de Estéril
Taxa de Disposição	Baixa	- < 25 m ³ /banco por metro linear de crista por dia; - Taxa de avanço da crista < 0.1 m por dia.	0	100
	Moderada	- 25 - 200 m ³ /banco por metro linear de crista por dia; - Taxa de avanço da crista de 0.1 m - 1.0 m por dia.	100	
	Alta	- > 200 m ³ /banco por metro linear de crista por dia; - Taxa de avanço da crista > 1.0 m por dia.	200	
Sismicidade	Baixa	Zona de risco sísmico 0 e 1 (Escala Richter);	0	0
	Moderada	Zona de risco sísmico 2 e 3;	100	
	Alta	Zona de risco sísmico 4 ou maior.	200	
Pontuação máxima possível de Estabilidade da Pilha: 1800				650

Assim, para cada fator é dada uma pontuação e uma avaliação global da estabilidade da pilha é calculada com a soma das avaliações individuais para cada um dos vários fatores analisados. A pontuação máxima a ser obtida é de 1800, esclarecendo-se que quanto maior o total de pontos maior o potencial de instabilidade da pilha, com a pontuação de 650 para a pilha de disposição de estéril. Conclui-se que esta pontuação alcançada atende aos critérios requeridos para garantir a segurança e estabilidade física da pilha de estéril, onde satisfazem aos critérios de classificação com potencial de ruptura moderado, adotado pelo governo canadense (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991).

O Mined Rock and Overburden Piles (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991) relata que o sistema de classificação com base nos fatores acima quando aplicado a uma determinada pilha a coloca em uma das quatro categorias previstas no método.

Essas classes definem um nível de esforço recomendado para investigação, projeto e construção da pilha, como pode ser observado na tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Classificação da Estabilidade da Pilha e Nível de Esforço Recomendado (modificado de BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991)

Classificação da Estabilidade da Pilha	Potencial de Ruptura	Nível de Esforço recomendado para Investigação, Projeto e Construção	Faixa de Pontuação da Pilha
I	Desprezível	<ul style="list-style-type: none"> - Reconhecimento básico do local, documentação de referência; - Programa mínimo de ensaios de laboratório; - Rotina de checagem de estabilidade, possivelmente usando ábacos; - Restrições mínimas na construção; - Monitoramento apenas visual. 	< 300
II	Baixo	<ul style="list-style-type: none"> - Investigação completa do local; - Poços de inspeção, amostragem pode ser obrigatória; - Programa limitado de ensaios de laboratório; - Estabilidade pode ou não influenciar o projeto; - Análise básicas de estabilidade obrigatórias; - Certas restrições na construção; - Monitoramento visual e de instrumentos de rotina. 	300 - 600

Classificação da Estabilidade da Pilha	Potencial de Ruptura	Nível de Esforço recomendado para Investigação, Projeto e Construção	Faixa de Pontuação da Pilha
III	Moderado	<ul style="list-style-type: none"> - Investigação detalhada do local, em etapas; - Poços de inspeção obrigatórios, ou outras investigações de subsuperfície podem ser obrigatórias; <ul style="list-style-type: none"> - Amostragem indeformada pode ser obrigatória; - Programa detalhado de ensaios de laboratório, incluindo propriedades-índice, resistência ao cisalhamento e durabilidade provavelmente obrigatórios; - Estabilidade influencia e pode controlar o projeto; <ul style="list-style-type: none"> - Análises de estabilidade detalhadas, possivelmente estudos paramétricos, obrigatórios; - Projeto básico pode ser obrigatório para aprovação/missão; - Restrições moderadas na construção (ex. taxa de carregamento limitada, espessuras das camadas, qualidade do material, drenagem superficial adequada, etc.); <ul style="list-style-type: none"> - Monitoramento detalhado de instrumentação para confirmar projeto, documentar performance e estabelecer limites de carregamentos. 	600 - 1200

Classificação da Estabilidade da Pilha	Potencial de Ruptura	Nível de Esforço recomendado para Investigação, Projeto e Construção	Faixa de Pontuação da Pilha
IV	Alto	<ul style="list-style-type: none"> - Investigação detalhada do local em etapas; - Poços de inspeção e possíveis trincheiras, obrigatórios; - Sondagens e outras possíveis investigações subsuperficiais provavelmente obrigatória; - Amostragem indeformada provavelmente obrigatórias; - Programa detalhado de ensaios, incluindo propriedades-índice, resistência ao cisalhamento e durabilidade provavelmente obrigatórios; - Considerações sobre estabilidade essenciais; - Análises de estabilidade detalhadas, possivelmente incluindo estudos paramétricos e avaliações completas de alternativas provavelmente obrigatórias; - Projeto básico possivelmente obrigatório para aprovação/missão; - Restrições severas na construção (ex. taxas limite de carregamento, espessuras das camadas, qualidade do material, drenagem superficial, etc.); - Monitoramento detalhado de instrumentação para confirmar projeto, documentar performance e estabelecer limites de carregamento. 	> 1200

As exigências de monitoramento podem ser levantadas por meio do sistema de classificação. É possível identificar o monitoramento adequado para a fase em que a pilha se encontra. O caso da pilha de disposição de estéril foi classificado na classe III com potencial de ruptura moderado, onde é exigido monitoramento com instrumentos, além do visual.

Os relatórios de monitoramento devem conter uma análise de todos os aspectos do programa de monitoramento e devem ser feito por um profissional com a devida experiência em geotecnia. Para ativar uma pilha recomenda-se seguir também as orientações descritas na tabela 5.9 de monitoramento, inspeção e exigências para reabertura, para evitar possíveis transtornos.

Tabela 5.9 - Monitoramento, Inspeção e Exigências para Reabertura (modificado Eaton et al., 2005)

Classes da Pilha	Pontuação da Pilha	Monitoramento Instrumental	Descrição	Frequência	Relatórios
I	< 300	<ul style="list-style-type: none"> - Inspeção visual , a menos que sejam observadas movimentações não esperadas - Piezômetros onde aplicável 	Encarregado de turno faz a inspeção	4 horas	Relatórios diário
			Encarregado de turno faz a inspeção	Anual	Relatório interno anual
II	300-600	<ul style="list-style-type: none"> - Instrumentação necessária se movimentações outras que as devidos ao adensamento são observadas; - Piezômetros onde aplicável 	Encarregado de turno faz a inspeção	4 horas	Relatório diário
			Inspeção e interpretação dos resultados da instrumentação feita pelo engenheiro	Diário	
			Inspeção periódica detalhada realizada pelo engenheiro	Quadrimestral Anual	Relatório de inspeção quadrimestral Relatório interno anual
III	600-1200	<ul style="list-style-type: none"> - Instrumentação para monitoramento de movimentações necessárias como especificado pelo projetista; - Piezômetros onde aplicável 	Encarregado de turno faz a inspeção	4 horas	Relatório Diário
			Inspeção e interpretação dos resultados da instrumentação feita pelo engenheiro	Diário	
			Inspeção periódica detalhada realizada pelo engenheiro	Mensal	Relatório interno de inspeção quadrimestral
			Inspeção por um auditor independente	Anual	Relatório anual feito por auditor independente
IV	> 1200	<ul style="list-style-type: none"> - Programa de inspeção detalhada a ser especificado pelo projetista; - Piezômetros onde aplicável - Piezômetros em fundações provavelmente necessários se solos finos estiverem presentes 	Encarregado de turno faz a inspeção	4 horas	Relatórios Diário
			Inspeção e interpretação dos resultados da instrumentação feita pelo engenheiro	Diário	
			Inspeção periódica detalhada realizada pelo engenheiro	Mensal	Relatório interno de inspeção quadrimestral
			Inspeção por um auditor independente	Anual (mínimo)	Relatório anual feito por auditor independente, ou com maior frequência se exigido pela fiscalização

6 Conclusão

O trabalho contemplou um estudo de caso no qual foram mostradas as principais etapas do dimensionamento de uma pilha de estéril, a saber: análise da estabilidade dos taludes a partir do modelo geológico geotécnico; avaliação do fator de segurança mínimo; determinação da capacidade de armazenagem e configuração geométricas da pilha, sempre levando em conta os parâmetros de segurança exigidos pelo porte de tal empreendimento. Os resultados alcançados mostraram que os parâmetros considerados no estudo de caso atenderam aos critérios requeridos para garantir a estabilidade física da pilha de estéril, deste modo, estão de acordo com as normas de segurança ditadas pela legislação brasileira e pela prática geotécnica internacional.

Também contemplou um sistema de classificação de pilhas desenvolvido para o governo canadense com base na estabilidade física de uma pilha de estéril (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991). No caso em estudo, obteve-se a pontuação de 650 para a pilha de disposição de estéril, cujo valor representa potencial de ruptura moderado onde atende aos critérios requeridos para garantir a segurança e estabilidade física da pilha de estéril, segundo os critérios de classificação adotados pelo governo canadense (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991).

No Brasil não existe normatização para este tipo de classificação de pilha de estéril, logo, não há referencia nacional para confrontar e comparar os resultados alcançados pelos critérios canadenses. Portanto, não tenho como aferir se esses critérios são aceitos pela legislação brasileira.

7 Sugestões para futuras pesquisas

Abaixo apresenta algumas sugestões para futuras pesquisas para contribuir para o aprofundamento do tema:

- O FMEA é um sistema técnico apropriado para identificar e quantificar riscos, além de identificar e priorizar medidas de mitigação. O objetivo é permitir uma análise estruturada e transparente para avaliar o potencial, ou a probabilidade de falha das estruturas, equipamentos e processos, além de permitir os efeitos ou consequências de tais falhas. FMEA é o acrônimo para “Failure Modes and Effects Analysis”, ou seja, análise dos modos de falha e seus efeitos. Fornece uma avaliação sistemática do potencial de ruptura ou falha, segundo vários modos, danos e consequências dessa falha. Os danos e consequências são avaliados com respeito a impactos biológicos do uso da terra, impactos na legislação, instrumentos regulatórios, preocupação do público em geral e imagem, impacto na saúde e segurança. Um perfil de risco pode ser desenvolvido para cada uma dessas áreas de interesse;
- A drenagem superficial é um fator que afeta a estabilidade de pilhas, apesar de não ser considerada na ferramenta em estudo. Aconselham-se análises e subsequentes avaliações do comportamento das pilhas e de rupturas, podendo assim, acrescentar esse item, ao sistema de classificação;
- Acrescentar ao método, variáveis que afetam a estabilidade química da pilha;
- A codisposição e disposição compartilhada de rejeito e estéril, apesar de não se encontrar totalmente consolidado no meio acadêmico, é a situação em que mistura previamente os rejeitos ou o rejeito com o estéril para em seguida dispor. Esta disposição compartilhada é a situação em que os rejeitos ou o rejeito e o estéril são dispostos num mesmo local;
- A drenagem ácida, ainda que bem conhecido no meio acadêmico e das mineradoras, se faz necessário atenção especial devido aos riscos ambientais e aplicação de recursos de controle tecnológico e controle químico para aumentar a segurança ambiental, inclusive do tratamento da água ácida gerada pelo fenômeno.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5681: Controle Tecnológico da Execução de Aterros em Obras de Edificações**. Rio de Janeiro, 1980.
- _____. **NBR 6484: Solo – Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. **NBR 6502: Rochas e Solos**. Rio de Janeiro, 1995.
- _____. **NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro, 1984.
- _____. **NBR 7250: Identificação e Descrição de Amostras de Solos Obtidas em Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos**. Rio de Janeiro, 1982.
- _____. **NBR 8036: Programação de Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos para Fundação de Edifícios**. Rio de Janeiro, 1983.
- _____. **NBR 8044: Projeto Geotécnico**. Rio de Janeiro, 1983.
- _____. **NBR 9061: Segurança de Escavação a Céu Aberto**. Rio de Janeiro, 1985.
- _____. **NBR 9653: Guia para Avaliação dos Efeitos Provocados pelo Uso de Explosivos nas Minerações em Áreas Urbanas - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 9732: Projeto de Terraplenagem - Rodovias**. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 1995.
- _____. **NBR 10151: Acústica – Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas, visando o conforto da Comunidade - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2000.
- _____. **NBR 10152: Níveis de Ruído para Conforto Acústico**. Rio de Janeiro, 1995.
- _____. **NBR 11682: Estabilidade de Taludes**. Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **NBR 13028: Elaboração e Apresentação de Projeto de Disposição de Rejeitos de Beneficiamento, em Barramento, em Mineração**. Rio de Janeiro, 1993.
- _____. **NBR 13029: Elaboração e Apresentação de Projeto de Disposição de Estéril, em Pilha, em Mineração**. Rio de Janeiro, 1993.

_____. **NBR 13133: Execução de Levantamento Topográfico.** Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 13441: Rochas e Solos.** Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 13896: Aterros de Resíduos não Perigosos – Critérios para Projeto, Implantação e Operação.** Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 15421: Projeto de Estruturas Resistentes a Sismos - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2006.

Apostila sobre formação de depósito de estéril e rejeito – Relatório interno Vale - 2000

BATES, J. **Barragens de Rejeitos.** 1ª edição. São Paulo: Signus Editora, 2003. 122 p..

BOHNET, E. L., **Optimum Dump Planning in Rugged Terrain.** McCarter, M. K. (1985). Design of Non-impounding Mine Waste Dumps, AIME, New York, Chapter 3, p.23-27.

CALDWELL, J.A.; MOSS, A.S.E. **The simplified analysis of mine waste embankments.** Symposium on Design of Non-impounding Mine Waste Embankments. Denver USA. AIME Fall Meeting, 1981.

CARUCCIO, F.T; GEIDEL, G.; WILLIAMS, R. **Induced alkaline recharge zones to mitigate acidic seeps.** Lexington, KY: Proceedings of the Symposium of Surface Mining, Hydrology, Sedimentology, and Reclamation, 1984. pp. 43-47.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S. A. (Eletrobrás). **Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas.** Diretoria de Engenharia. 458 pág. (2000).

CHAVES, A. P., Peres, A. E. **TEORIA E PRÁTICA DO TRATAMENTO DE MIÉRIOS.** 2º Edição. Volume 3. São Paulo. Signus Editora, 2003. 662 p.

COUZENS, T. R. **Planning Models: Operating and Environmental Implications.** McCarter, M. K. (1985). **Design of Non-impounding Mine Waste Dumps,** AIME, New York, Chapter 2, p.15-19.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. DER/SP. ET-DE-B00/001. **Sondagens.** São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Drenagem de Rodovias.** 2006. 327 p.

DUNNICLIFF, J. **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**. Ed. JohnWiley and Sons, 1988.ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS PADRONIZADAS. Manual de Irrigação. 5ª edição. Brasília: Bureau of Reclamation, 2002. 603 p.

EATON, T., BROUGHTON, S., BERGER, K. C., Piteau Associates Engineering Ltd (2005). **Course Introduction Design and Operation of Large Waste Dumps**. Under Licence from the British Columbia Ministry of Energy and Mines - Mine Dump Committee.

ERRINGTON, J.C. and FERGUSON, K.D., 1987. **Acid mine drainage in British Columbia: today and tomorrow**. Proceedings of the Acid Mine Drainage Seminar/Workshop, Halifax, Nova Scotia, March 23-26, p.67-87. Environment Canada Catalogue En 40-11-7/1987.

FILHO, C. G. Q; FEITOSA, V. M. M.; COSTA, A. G. D.; PORTO, N. L. F.; ROCHA, D. J. L.; JUNIOR, A. C. **Mina de Alegria: exemplo de pilha de estéril formando um barramento**. Simpósio sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos – REGEO, Rio de Janeiro, 1991.

FRANCO, D. **Metodologia construtiva de pilhas de estéreis e de barramentos vs. otimização de custos**. Simpósio sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos – REGEO, Rio de Janeiro, 1991.

GROENEWOLD, G.H., WINCZEWSKI, L.M. **Probable causes of surfasse instability in contoured strip-mine spoils-Western North Dakota**. Annual Proceedings of the North Dakota Academy of Science, 1977, p. 160-167.

HADDAD, J. F. **Vida útil e segurança de um aterro industrial**. Simpósio sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos – REGEO, Rio de Janeiro, 1991.

HAWKINS, J.W.; ALJOE, W.W. **Hydrologic characteristics of a surfasse mine spoil aquifer**. Montreal, Canada: Proceedings of the Second International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, Tome 1, 1991. p. 47-68.

Kügler, H. **Zur Aufgaben der geomorphologischen Forschung und Kartierung in der DDR**. Petermanns Geographische Mitteilungen, V. 120, n. 2, p. 154-160, 1976.

McCARTER, M. K. (1985). **Design of Non-Impounding Mine Waste Dumps**, AIME, New York, p. iii.

McCARTER, M. K. **Design and Operating Considerations for Mine Waste Embankments**. Source: Surface Mining, 1990. p. 890 - 899.

MORAN, S.R., CHERRY, J.A., REHM, B., GROENEWOLD, G.H. **Hydrologic impacts of surface mining of coal in western North Dakota**. Proceedings of the Symposium on Surface Mining Hydrology, Sedimentology and Reclamation, Lexington, KY, 1979, p. 57-65.

PHHELPS, L.B. **Characterization of mine spoil properties as tool for premining planning.** Proceedings of the Symposium on Surface Mining Hydrology, Sedimentology and Reclamation, Lexington, KY, 1983, p. 47-51.

REHM, B.W., GROENEWOLD, G.H., e MORIN, K.A. **Hydraulic properties of coal and related materials,** Northern Graet Plains, Groundwater, 1980, v.20, p.217-236.

ROBERTSON, A. MacG. & Shaw, S. (2003): **Risk Management for Major Geotechnical Structures on Mines.** In proceedings of Computer Applications in the Mineral Industries (CAMI), Calgary, Alberta, Canada, p. 8 - 10.

ROBERTSON, A. MacG., STEFFEN & KIRSTEN (1985). **Mine Waste Disposal: An Update on Geotechnical and Geohydrological Aspects.** Vancouver, Canadá, Vol. 1, 24p.

ROBERTSON, A. M.; SHAW, S. C. **Use of the multiple accounts analysis process for sustainability optimization.** In: SME ANNUAL MEETING, 2004, Denver, Colorado. Proceedings... Denver, Colorado: [s.n.], 2004. 8 p. Disponível em: <http://www.robertsongeoconsultants.com/papers/MAA_SME_2004.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2015.

ROBERTSON, S.; KIRSTEN (B.C.). **Draft Acid Rock Drainage Technical Guide.** British Columbia Acid Mine Drainage Task Force Report. 274p, Vancouver – Canadá, 1989.

RODRIGUES, J.A. **Drenagem do Bota-Fora 4 (Mina de Urânio de Caldas): Aspectos Hidroquímicos e Hidrogeológicos.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG, 2001. 207 p.

RUBIO, J. **Aspectos ambientais no setor minero-metalúrgico.** Em: Capítulo 13 do livro “Tratamento de Minérios”; A.B. da Luz, M.V. Possa e S.L. de Almeida(Eds), CETEM-CNPq-MCT, 1998. p 537-570.

SESTREM, L. P. **Concepção e Implantação de um Plano de Instrumentação para Avaliação das Condicionantes Geotécnicas de uma Encosta Litorânea.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná– Curitiba, Paraná, 2012.

SHINOBE, A. e SRACEK, A.(1997). **Drenagem Ácida e Seu Impacto Ambiental.** Revista Saneamento Ambiental, v.48, p.20-22.

SILVA, A. P. M., VIANA, J. P., CAVALCANTE, A. L. B. **Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração.** Caderno de Diagnostico, 2011. 41 p.

SOUZA, L.E. **Estimativa de incertezas e sua aplicação na classificação de recursos minerais.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), 2002. 171 p.

USACE - U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Slope Stability**. Engineer Manual, EM 1110-2-1902. 2003. 25 p.

USBM - U.S. Bureau of Mines (1982). **Development of Systematic Waste Disposal Plans for Metal and Non-metal Mines**. Minerals research contract report (Contract No. 50208033) for U.S. Dept. Int. Prepared by Goodson and Associates, Inc., 614p., June. General Reference on Mine Dumps.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – U. S. EPA (1994). “**Acid Mine Drainage Prediction**”. Technical Document, p. 1-32, EPA 530-R-94-036.

VANDRE, B.C., 1980. **Stability of Non-Impounding Mine Waste Embankments**. USDA Forestry Service, Ogden, Utah. March. Stability Analysis, Stability Charts

VANDRE, B.C., ANDRESON, L. R., 1981. **Stability of Waste-Shale Embankments**. Transportation Research Record 790, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D. C., p 18-26.

WELSH, J.D. **Geotechnical Site Investigation**. McCARTER, M. K. (1985). Design of Non-Impounding Mine Waste Dumps, AIME, New York, Chapter 4, p 31-34.